

TESIS DOCTORAL

***Diseño de un sistema de detección del
deslizamiento lateral para neumáticos
instrumentados mediante extensometría***

Autor:

Jorge Yunta Ramírez

Directores:

Dr. D. Daniel García-Pozuelo Ramos

Dr. D. Vicente Díaz López

DOCTORADO EN INGENIERÍA MECÁNICA Y ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

Leganés, febrero de 2018

TESIS DOCTORAL

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DEL DESLIZAMIENTO
LATERAL PARA NEUMÁTICOS INSTRUMENTADOS MEDIANTE
EXTENSOMETRÍA**

Autor: Jorge Yunta Ramírez

Directores: Dr. D. Daniel García-Pozuelo Ramos
Dr. D. Vicente Díaz López

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: Dr. D. José Luis San Román García

Vocal: Dr. D. Gabriel Anghelache

Secretario: Dr. D. Fernando Viadero Rueda

Calificación:

Leganés, de de

Agradecimientos

A Marta, por tu cariño y apoyo incondicional en lo personal y en lo profesional. Sólo tú eres consciente del trabajo que hay detrás de esta Tesis. Me resulta imposible contar las veces que me has ayudado, esas tardes de pelea con Excel y Matlab, que supusieron el mayor punto de inflexión de la Tesis, estarán siempre en mi memoria. Gracias por ser mi confidente, por ayudarme a mantener la calma y la ilusión cuando pensaba que estaba todo perdido, por creer en mí. Gracias por ayudarme a hacer mis sueños realidad y alegrar todos los momentos de mi vida, por ser como eres. Sabes que formas parte de esta Tesis.

A mis padres, por vuestro esfuerzo, vuestro amor, vuestro ejemplo y vuestros valores, por darme la oportunidad de vivir la vida que he querido y proporcionarme todo cuanto he necesitado para llegar hasta aquí.

A mi hermana Beatriz, a Santiago, y a Triana, por transmitirme vuestra alegría, por animarme y apoyarme, por vuestro cariño.

A Alejandro, por tu inestimable apoyo, por transmitirme sus inquietudes y conocimientos, por tu confianza.

A mis amigos de toda la vida, Martínez, Javi y Barroso, por darme vuestra compañía, apoyo y cariño estando en Inglaterra, Italia, España, o cualquier otro rincón del planeta. Sois los mejores amigos que podría tener.

A Daniel García-Pozuelo, por transmitirme tus conocimientos y experiencia durante estos dos años y medio de trabajo. Gracias por darme la oportunidad de trabajar contigo y proponerme un tema de investigación que me apasiona, por darme las mejores cartas para jugar esta partida. Tu vocación y tu pasión por la investigación y los automóviles me ha servido de motivación para seguir cuando las cosas no salían como estaba previsto.

A Vicente Díaz López, por transmitirme tus conocimientos y experiencia y darme la oportunidad de trabajar en el Departamento. Gracias por la ayuda recibida para que la Tesis llegara a buen puerto y por el apoyo para alcanzar los retos propuestos.

A la Universidad Carlos III de Madrid, por concederme una beca para poder realizar mi estancia en Birmingham.

A la *University of Birmingham*, y en especial a Remi, por tus conocimientos, experiencia y entusiasmo, por el apoyo y la calurosa acogida durante mi estancia, por tratarme como uno más y poner todos los medios y recursos del laboratorio a mi disposición para que pudiera realizar los ensayos y obtener la Mención Internacional de Doctorado. Eres un ejemplo de profesionalidad y compromiso.

A Nasim y Hamad, por vuestra generosidad, amabilidad y hospitalidad, por tantas horas en el laboratorio ayudándome de forma desinteresada a sacar los ensayos adelante. Gracias por vuestros ánimos y por escuchar mis lamentos y frustraciones cuando las cosas por Birmingham no salían como esperaba. Fui todo un afortunado de encontrarme con gente de tanta calidad humana.

A Daniel, por compartir conmigo tus conocimientos y su experiencia. Tu entusiasmo y tus consejos no tienen precio. Es difícil encontrar personas como tú y poder contar con ellas para lo que sea, me siento realmente afortunado por ello.

A mis compañeros del grupo MECATRON y del Departamento de Ingeniería Mecánica, por su compañía durante este tiempo. Especialmente a M^a Jesús y Beatriz, por ayudarme en todo cuanto estaba en sus manos y por vuestra vocación por la investigación; a María, Jonathan, Carlos, Noelia y todos los estudiantes de doctorado y máster por tantos buenos ratos, por todas las veces que hemos comido juntos, por vuestra amistad y cariño todo este tiempo.

En especial, quiero mostrar mi agradecimiento a Gerardo, por tu simpatía y buen rollo; a Andrés, por tu sentido del humor y su inestimable transferencia de conocimiento; a Sergio, por tu confianza, ayuda y positivismo; a Jaime, por todos esos ratos de conversación que hemos tenido sobre la vida en general; y a todos aquellos con los que he compartido el despacho 31. Me siento afortunado de haber estado rodeado no sólo de buenos compañeros, sino también de buenas personas.

A Fernando Serrano, por tu implicación y ayuda para mecanizar la llanta, por tu sinceridad, tus consejos y tu pasión por el trabajo bien hecho.

A todos y todas l@s que no hayan sido nombrados y que me hayan apoyado para poder realizar la Tesis, os estaré siempre agradecido.

Resumen

Los neumáticos han sido siempre un área de interés tanto para la sociedad como para la industria automovilística. Como los únicos elementos que mantienen el contacto entre el vehículo y la calzada, los neumáticos son un factor clave en el rendimiento, confort, consumo de combustible y seguridad de los vehículos. Aunque las prestaciones de los neumáticos actuales son adecuadas para la gran mayoría de situaciones, éstos son sólo elementos pasivos que no asisten activamente a los conductores o a los sistemas de control de los vehículos para mejorar la experiencia de conducción y la seguridad del tráfico.

Debido a las características no lineales del contacto neumático-calzada, es difícil aplicar la fuerza exacta al pedal para detener el vehículo en la mínima distancia sin bloquear las ruedas ni perder el control del vehículo, que podría resultar en un accidente de tráfico a menos que el control de estabilidad (ESP) o el ABS actúen. Además, la situación podría empeorar si las condiciones de la calzada no son óptimas, como en caso de lluvia o barro donde la fricción varía. La posibilidad de que los neumáticos contribuyan activamente en este tipo de situaciones depende de su capacidad para proporcionar información a conductores y sistemas electrónicos para que intervengan antes de que se produzca un accidente. Estos son algunos de los motivos para desarrollar los denominados “neumáticos inteligentes”, comúnmente definidos como neumáticos instrumentados con sensores que serían capaces de proporcionar información en tiempo real sobre las condiciones de trabajo e interactuar con diferentes sistemas de control del vehículo para mejorar sus prestaciones, así como prevenir a los conductores de potenciales peligros. Sin embargo, para la obtención de información a partir de dichos sensores se deben considerar múltiples obstáculos, como la compatibilidad de los mismos con las características del caucho, la transmisión de datos o temas económicos, pero, sobre todo, el mayor obstáculo es cumplir con las necesidades energéticas de los componentes electrónicos.

El potencial y las dificultades para su desarrollo hacen de los neumáticos inteligentes uno de los más prometedores y ambiciosos campos de investigación para ingenieros e investigadores. Los sistemas de monitorización de la presión del neumático (TPMS) fueron introducidos en 2002, siendo los primeros sistemas producidos y desarrollados en masa. Aunque fueron un gran logro, el potencial del neumático inteligente es aún mayor; tendría el objetivo final de monitorizar en tiempo real las fuerzas en el contacto neumático-calzada, el coeficiente de fricción, la condición de la calzada, etc. De este modo, el vehículo tendría un sistema de seguridad activo con información fiable sobre las condiciones de trabajo del neumático.

En esta Tesis Doctoral se presenta un método de estimación de las condiciones de trabajo de un neumático instrumentado mediante extensometría y el coeficiente de adherencia lateral solicitado en el contacto neumático-calzada, detectando el deslizamiento lateral del mismo.

Se han llevado a cabo una serie de ensayos mediante bandas extensométricas y un banco de pruebas de neumáticos. Estos equipos se eligieron para medir la deformación del neumático bajo condiciones dinámicas, que podrían ayudar a introducir sistemas de neumáticos inteligentes en un futuro próximo. Los ensayos se centran en analizar la influencia de la presión de inflado, la fuerza vertical, el ángulo de deriva y el ángulo de caída

en los valores máximos de deformación y la medida de fuerza lateral para establecer cómo estos parámetros están relacionados. Los datos experimentales se han utilizado para estimar condiciones de trabajo mediante lógica difusa, desarrollando un sistema de detección del deslizamiento basado en un modelo experimental del comportamiento de la fuerza lateral.

Los resultados de los ensayos y de las simulaciones confirman la viabilidad de las bandas extensométricas y del modelo computacional propuesto para resolver las características no lineales de los parámetros del neumático, convirtiendo éste en un sistema de seguridad activo.

Abstract

Tires have always been an area of interest for society and the automotive industry as well. As the only part that keeps the contact between the vehicle chassis and the road, they are a key factor on performance, comfort, fuel consumption and safety of vehicles. Despite the fact that current tires perform well in a huge variety of situations, they are just passive elements that do not contribute actively to driver or vehicle control systems to improve the driving experience and traffic safety.

Due to the non-linear tire-road contact features, it is difficult to apply the exact braking force to stop the vehicle for the minimum distance without locking the wheels and, as a consequence, losing control of the vehicle which may result in a traffic accident unless Electronic Stability Control (ESC) or Anti-Lock Braking System (ABS) take action. Moreover, the situation may be even worse if unsuitable road conditions are considered, like wet or muddy surfaces where friction changes. The possibility of tires to take active part in this sort of situations is subject to its potential to provide information for drivers and active control systems to intervene before a crash occurs. These are some of the reasons to develop the so-called “intelligent tires”. They are usually define as tires equipped with sensors that would be able to monitor and provide information in real time about tire working conditions and interact with different vehicle dynamics control systems to improve their performance as well as warning the driver of potential hazards. However, in order to get information from sensors equipped in tires many obstacles must be overcome, such as the compatibility of the sensors with tire rubber properties, data transmission or economic issues, but above all the main obstacle is to meet the power requirements of all the electronic components.

The prospects and difficulties of intelligent tires them in one of the most promising and ambitious research fields for researchers and automotive engineers. Concerning intelligent tires’ developments, the Tire Pressure Monitoring Systems (TPMS) were introduced in 2002, these being the first such systems introduced in the automotive market. Although they were a great achievement, intelligent tire technology has bigger prospects than TPMS. The intelligent tire concept would have the final aim of monitoring, in real time, the forces at the tire-road interface, friction coefficient, slip angle, road condition, and tire wear. In this way, the vehicle would have an active safety system provided with reliable information about the tire working conditions.

In this Thesis, a strain-based method to estimate tire working conditions, lateral friction coefficient and detect the lateral tire’s slip is presented.

A series of experiments by means of a tire equipped with strain sensors on an indoor tire test rig have been carried out. This equipment was selected to measure strain dynamic behaviour based on tire working conditions, which could help to introduce intelligent tire systems in the near future. The tests focused on the influence of pressure, rolling speed, vertical load, slip angle and camber angle on maximum strain values and lateral force measurements to elucidate how tire’s deformation and lateral force are interconnected.

The experimental data have been used to estimate some tire working conditions by Fuzzy Logic, developing a tire slip detection system based on an experimental model of the

lateral force behaviour to estimate the lateral friction coefficient and detect the tires' loss of grip.

The simulation and test results confirm the feasibility of strain sensors and the proposed computational model to solve the non-linearity characteristics of the tires' parameters and turn tires into an active safety system.

Lista de símbolos

A_{cs}	Área de contacto entre el soporte inferior del DAQ y la llanta	$[m^2]$
A_{rt}	Área resistente a tracción de los tornillos	$[m^2]$
A_c	Área de contacto entre el soporte de la batería y la llanta	$[m^2]$
c_{fap}	Coefficiente de rozamiento aluminio-plástico	$[-]$
c_{fag}	Coefficiente de rozamiento aluminio-goma	$[-]$
C_1, C_2 y C_3	Coefficientes del modelo experimental	$[-]$
d_n	Avance del neumático	$[m]$
d	Distancia de los sensores al plano medio longitudinal	$[m]$
F_{ct}	Fuerza centrífuga por tornillo	$[N]$
F_t	Fuerza tangencial	$[N]$
$F_{V,Rd}$	Resistencia a cortante de los tornillos	$[N]$
$F_{V,Ed}$	Esfuerzo cortante que actúa sobre el tornillo	$[N]$
$F_{t,Ed}$	Esfuerzo axil que actúa sobre el tornillo	$[N]$
$F_{t,Rd}$	Resistencia a tracción del tornillo	$[N]$
F_z	Fuerza vertical	$[N]$
F_y	Fuerza lateral	$[N]$
F_l	Fuerza lateral que actúa sobre el neumático	$[N]$
f_{ub}	Tensión última a tracción de los tornillos	$[N/m^2]$
I_x	Inercia de la sección en x	$[m^4]$
I_y	Inercia de la sección en y	$[m^4]$
LFC	Lateral Friction Coefficient	$[-]$
l	Distancia longitudinal entre las rosetas	$[m]$
M_H	Momento en el plano H	$[Nm]$
M_V	Momento en el plano V	$[Nm]$
m_{total}	Masa total del conjunto DAQ-soporte de aluminio	$[kg]$
$m_{bateria}$	Masa total del conjunto batería-estructura	$[kg]$
N	Par de giro de la llanta	$[Nm]$
n	Coefficiente de seguridad	$[-]$
n_t	Número de uniones atornilladas	$[-]$
Pa_T	Par de apriete total de los tornillos	$[Nm]$
R_{llanta}	Radio de la llanta	$[m]$
s_y	Límite de fluencia del material PLA	$[Pa]$
v	Velocidad lineal máxima	$[m/s]$
w	Velocidad angular	$[rad/s]$
z^*	Centro de gravedad del conjunto de salida (centroide)	$[-]$
α	Ángulo de deriva	$[^\circ]$
γ	Ángulo de caída	$[^\circ]$
γ_{Mb}	Coefficiente parcial de seguridad de los tornillos	$[-]$
ε	Deformación	ε
μ	Coefficiente de adherencia	$[-]$
$\mu_A(x)$	Función de pertenencia	$[-]$

Índice

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract.....	V
Lista de símbolos	VII
Índice de tablas.....	XIII
Índice de figuras.....	XV
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Estructura de la Tesis Doctoral.....	2
Capítulo 2 Estado del arte	3
2.1 El neumático inteligente	3
2.1.1 Necesidad y potencial del neumático inteligente	4
2.1.2 Sistemas implementados, tendencias, objetivos y problemática del neumático inteligente.....	5
2.2 Estudios previos.....	8
2.2.1 Avances en el desarrollo del neumático inteligente	8
2.2.2 Sensores utilizados para medir la deformación del neumático	13
2.2.2.1 Técnicas intrusivas.....	15
2.2.2.2 Técnicas no intrusivas	19
2.2.3 Alimentación de sensores y transmisión de información	20
2.2.3.1 Generación de energía	20
2.2.3.2 Transmisión de información.....	23
2.2.4 Avances en las herramientas computacionales.....	24
Capítulo 3 Objetivos.....	27
Capítulo 4 Fases de la Tesis Doctoral.....	29
Capítulo 5 Materiales y métodos	31
5.1 Equipamiento	31
5.1.1 Banco de ensayo de neumáticos	31
5.1.2 Sensores	33
5.2 Instrumentación de neumáticos.....	35
5.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	35
5.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II.....	42

5.3 Metodología de ensayo	55
5.3.1 Primera fase experimental: neumático tipo I	55
5.3.1.1 Condiciones de ensayo	57
5.3.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II.....	57
5.3.2.1 Condiciones de ensayo	59
Capítulo 6 Metodología de análisis	61
6.1 Estructura del análisis de resultados	61
6.1.1 Obtención de ciclos medios representativos	63
6.2 Influencia teórica de los parámetros de ensayo	64
6.2.1 Presión	64
6.2.2 Velocidad	64
6.2.3 Fuerza vertical.....	65
6.2.4 Ángulo de deriva.....	65
6.2.5 Ángulo de caída.....	66
6.2.6 Fuerza lateral	66
Capítulo 7 Análisis de resultados	69
7.1 Consideraciones previas	69
7.1 Condiciones de línea recta	71
7.1.1 Influencia de la velocidad	71
7.1.1.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	71
7.1.1.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	74
7.1.2 Influencia de la presión.....	75
7.1.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	75
7.1.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	77
7.1.3 Influencia de la fuerza vertical.....	77
7.1.3.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	77
7.1.3.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	80
7.2 Condiciones de paso por curva	83
7.2.1 Influencia del ángulo de deriva	84
7.2.1.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	84
7.2.1.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	86
7.2.2 Influencia de la velocidad	89
7.2.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	89
7.2.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	92
7.2.3 Influencia de la presión.....	94

7.2.3.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	94
7.2.3.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	97
7.2.4 Influencia de la fuerza vertical.....	97
7.2.4.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	97
7.2.4.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	103
7.2.5 Comportamiento de la fuerza lateral	105
7.2.5.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	105
7.2.5.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	108
7.2.6 Comportamiento del flanco.....	109
7.3 Conclusiones sobre los puntos de interés	110
7.3.1 Condiciones de línea recta.....	110
7.3.1.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	110
7.3.1.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	111
7.3.2 Condiciones de paso por curva.....	112
7.3.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I.....	112
7.3.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II	113
Capítulo 8 Sistema de detección del deslizamiento lateral	115
8.1 Metodología.....	115
8.2 Condiciones de línea recta	119
8.2.1 Estimación de la velocidad y la fuerza vertical	119
8.2.2 Resultados de estimación y validación.....	122
8.3 Condiciones de paso por curva	125
8.3.1 Estimación del ángulo de deriva y la fuerza vertical	125
8.3.2 Resultados de estimación y validación.....	127
8.4 Sistema de detección del deslizamiento lateral	130
8.4.1 Estimación del coeficiente de adherencia lateral solicitado.....	131
8.4.2 Implementación del SDS y estimación del LFC	133
Capítulo 9 Conclusiones	137
9.1 Conclusiones	137
9.2 Conclusions	140
Capítulo 10 Líneas futuras de investigación.....	145
Bibliografía.....	147
Anexo A Publicaciones en revistas científicas	153
Anexo B Participaciones en congresos.....	155

Índice de tablas

Tabla 2.1. Características de las fuentes de energía del neumático [5,55].	21
Tabla 2.2. Propiedades de los generadores de energía en el entorno del neumático [5].	22
Tabla 5.1. Ventajas y desventajas de las bandas extensométricas.	34
Tabla 5.2. Código de etiquetado de sensores para su correcta identificación.....	43
Tabla 5.3. Datos para el cálculo del coeficiente de seguridad de la estructura de sujeción de la batería.....	53
Tabla 7.1. Potencial de los puntos significativos en línea recta (primera fase experimental).	111
Tabla 7.2. Potencial de los puntos significativos en línea recta (segunda fase experimental).	112
Tabla 7.3. Potencial de los puntos significativos en condiciones de curva (primera fase experimental).	112
Tabla 7.4. Potencial de los puntos significativos en condiciones de paso por curva (segunda fase experimental).....	113
Tabla 8.1. Número de niveles y rango de cada variable.....	122
Tabla 8.2. Error medio de la fuerza vertical y del ángulo de deriva en los resultados de las simulaciones.	129

Índice de figuras

Figura 2.1. Potenciales beneficios del neumático inteligente.....	4
Figura 2.2. Innovación, integración e interacción de sistemas para conseguir un tráfico sin accidentes.	6
Figura 2.3. Estrategias planteadas para la consecución del neumático como una fuente de información.....	7
Figura 2.4. Influencia del desarrollo del "neumático inteligente" en retos a alcanzar en 2005 [5].	8
Figura 2.5. Estado del arte propuesto sobre los hitos (TPMS) y aplicaciones futuras del neumático inteligente [5].	9
Figura 2.6. Cronología reciente de las investigaciones más destacadas para el desarrollo del neumático inteligente.....	12
Figura 2.7. Clasificación de métodos utilizados en estudios previos para estimar la fricción.	13
Figura 2.8. Resumen de técnicas utilizadas para la medida de deformaciones en la banda de rodadura.....	14
Figura 2.9. Sidewall Torsion Sensor (SWT) y magnetización de los flancos del neumático [40].	15
Figura 2.10. Colocación del sensor piezoeléctrico en la parte exterior de un flanco del neumático [30].....	18
Figura 2.11. Colocación de las bandas extensométricas en la banda de rodadura [35].....	18
Figura 2.12. (a) Disposición del sensor óptico para medir la deformación de la banda de rodadura; (b) esquema de instalación del sensor óptico en la llanta [52].....	19
Figura 2.13. Ristra de generadores PZT en el interior de la banda de rodadura [57].....	22
Figura 2.14. Pasos básicos para plantear una investigación para el desarrollo del neumático inteligente.	25
Figura 4.1. Etapas de desarrollo de la Tesis Doctoral.....	29
Figura 5.1. (a) Banco de ensayos utilizado para la realización de ensayos; (b) esquema de los componentes principales del banco.....	31
Figura 5.2. Localización de las válvulas y células de carga del banco de ensayos.	32
Figura 5.3. (a) Banco de ensayos preparado para la realización de ensayos en curva; (b) ángulo de deriva aplicado al neumático mediante el dispositivo.	32
Figura 5.4. Esquema de funcionamiento de las bandas extensométricas y componentes principales.	34
Figura 5.5. Neumático tipo I.....	35
Figura 5.6. Disposición de las bandas extensométricas sobre la parte interior de la banda de rodadura del neumático tipo I.....	36
Figura 5.7. (a) Utilización del adhesivo de montaje; (b) pegado de las bandas sobre la banda de rodadura.....	36
Figura 5.8. Disposición de las bandas extensométricas en la roseta 2.	37
Figura 5.9. (a) Rosetas 1 y 2 pegadas en la banda de rodadura del neumático; (b) roseta 3.	37

Figura 5.10. Equipo de adquisición de datos Somat® 2000.....	38
Figura 5.11. Somat® 2000 equipado con baterías.	38
Figura 5.12. TestPoint® software para Windows (WinTCS).	39
Figura 5.13. (a) Parte exterior de la llanta modular; (b) módulo central.....	40
Figura 5.14. Instalación de válvulas en la llanta.	40
Figura 5.15. (a) Holgura del neumático sin inflar; (b) neumático inflado sin holgura.	41
Figura 5.16. (a) Lado izquierdo del neumático (en sentido de giro); (b) lado derecho con el Somat® 2000 sujeto en la llanta.	41
Figura 5.17. Localización radial de las bandas extensométricas en el neumático tipo II.	42
Figura 5.18. Disposición de los sensores en el set 1.....	43
Figura 5.19. (a) Pegado de bandas extensométricas en el set 1; (b) protección de los cables con parches.....	44
Figura 5.20. Elementos principales del equipo de adquisición Slice Micro DTS®.	44
Figura 5.21. Modificación cables de conexionado del Slice Micro DTS®.	45
Figura 5.22. Interfaz de Sliceware.	46
Figura 5.23. (a) Llanta monobloque, (b) contorno de la llanta.....	46
Figura 5.24. Diseño del soporte y distribución de los agujeros para su sujeción a la llanta.	47
Figura 5.25. Proceso de mecanizado de la llanta.....	47
Figura 5.26. (a) Ventana y taladros para el soporte del equipo de adquisición, (b) taladros para la sujeción de la batería, (c) resultado final.....	48
Figura 5.27. (a) Pieza inferior del soporte, (b) pieza superior del soporte.	48
Figura 5.28. (a) Adición del sustituto universal de juntas en las piezas del soporte, (b) atornillado y eliminación de material sobrante (c) resultado final del soporte.....	48
Figura 5.29. (a) Vista superior del encaje del soporte, (b) vista inferior.....	49
Figura 5.30. (a) Junta diseñada a medida, (b) junta instalada en el soporte.....	49
Figura 5.31. (a) Modelo CAD del soporte de la batería, (b) resultado final y fijación a la llanta.....	49
Figura 5.32. Extracción de los cables de las bandas a través de la ventana y conexionado con el equipo de adquisición.....	50
Figura 5.33. Neumático tipo II instrumentado.	50
Figura 5.34. Diagrama de esfuerzos de la estructura que sujeta la batería.....	53
Figura 5.35. Metodología de ensayo con el neumático tipo I.....	56
Figura 5.36. Diagrama del procedimiento llevado a cabo en los ensayos de la segunda fase experimental.....	58
Figura 5.37. Vista en planta superior del neumático tipo II apoyado sobre el tambor con ángulo de caída.	58
Figura 6.1. Efecto de la fuerza vertical en la señal de deformación en dirección lateral para 0,8 bar, 20 km/h y 750-1000 N.....	61
Figura 6.2. Deformación típica de la banda de rodadura al contactar con la calzada.	62
Figura 6.3. Ejemplo de la morfología de las curvas obtenidas.	62
Figura 6.4. Esquema del comportamiento del neumático sometido a esfuerzos laterales [77].	65
Figura 6.5. Influencia de la fuerza vertical en la capacidad de soportar esfuerzos transversales [78].....	67
Figura 6.6. Influencia del ángulo de deriva en la fuerza lateral [78].....	67
Figura 6.7. Evolución de la huella de contacto [79].....	68

Figura 6.8. Variación de la huella de contacto con el ángulo de caída del neumático [80].	68
Figura 7.1. Número de canal, localización y dirección de medida de los sensores analizados.	70
Figura 7.2. Efecto del ángulo de caída en la distribución de la fuerza vertical.	70
Figura 7.3. Influencia de la velocidad en el período de giro de la rueda.	71
Figura 7.4. Comparación de las curvas a diferentes velocidades en el canal 2 a 1 bar y 750 N.	72
Figura 7.5. Comparación de las curvas a diferentes velocidades en (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1 bar y 750 N.	73
Figura 7.6. Influencia de la velocidad en los valores máximos de deformación en los canales 1 y 3 para 1 bar y 750 N.	73
Figura 7.7. Influencia de la velocidad en los canales 1 y 2 a 250 N.	74
Figura 7.8. Influencia de la velocidad en los picos máximos de deformación en el canal 1 a 250 N.	75
Figura 7.9. Comparación de las curvas a diferentes presiones en el canal 2 a 30 km/h y 750 N.	76
Figura 7.10. Comparación de las curvas a diferentes presiones en (a) canal 1 y (b) canal 3 a 30 km/h y 750 N.	76
Figura 7.11. Influencia de la presión en los valores máximos de deformación en los canales 1 y 3 para 30 km/h y 750 N.	77
Figura 7.12. Comparación de las curvas a diferentes fuerzas verticales en el canal 2 a 1 bar y 30 km/h.	78
Figura 7.13. Comparación de las curvas a diferentes presiones en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1 bar y 30 km/h.	79
Figura 7.14. Influencia de la fuerza vertical en los valores máximos de deformación en el (a) canal 2 y (b) canales 1 y 3 a 1 bar y 30 km/h.	80
Figura 7.15. Influencia de la fuerza vertical en los canales 3 y 4 a 30 km/h.	81
Figura 7.16. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 3 a 30 km/h.	81
Figura 7.17. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 4 a 30 km/h.	82
Figura 7.18. Influencia de la fuerza vertical en el valor del offset en los canales 3 y 4 a 30 km/h.	82
Figura 7.19. Disposición de los sensores en la huella de contacto en condiciones de paso por curva.	83
Figura 7.20. Influencia del ángulo de deriva en el canal 2 para 1,2 bar, 750 N y 30 km/h.	84
Figura 7.21. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1,2 bar, 750 N y 30 km/h.	86
Figura 7.22. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 1 y (b) canal 5 a 250 N y 10 km/h.	87
Figura 7.23. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 3 y canal 4 a 250 N y 20 km/h.	88
Figura 7.24. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 3 y (b) canal 5 a 750 N y 20 km/h.	89
Figura 7.25. Influencia de la velocidad en el canal 2 a 1,2 bar, 750 N y 8°.	90
Figura 7.26. Influencia de la velocidad en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1,2 bar, 750 N y 8°.	91

Figura 7.27. Influencia de la velocidad en la entrada de la huella de contacto en el canal 2, 750 N y 1,2 bar.....	91
Figura 7.28. Influencia de la velocidad en la salida de la huella de contacto en el canal 3 a 750 N y 1,2 bar.....	92
Figura 7.29. Influencia de la velocidad en el (a) canal 3 y (b) canal 4 a 250 N y 6°.....	93
Figura 7.30. Influencia de la velocidad en los picos máximos de deformación en el canal 3 a 250 N y 6°.....	93
Figura 7.31. Influencia de la velocidad en los picos máximos de deformación en el canal 4 a 250 N y 6°.....	94
Figura 7.32. Influencia de la presión en el canal 2 a 750 N, 30 km/h y 8°.....	95
Figura 7.33. Influencia de la presión en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 750 N, 30 km/h y 8°.....	96
Figura 7.34. Influencia de la presión en la máxima deformación a tracción en el canal 2 a 750 N y 30 km/h.....	96
Figura 7.35. Influencia de la fuerza vertical en el canal 2 a 1,2 bar, 30 km/h y 8°.....	97
Figura 7.36. Influencia de la fuerza vertical en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1,2 bar, 30 km/h y 8°.....	98
Figura 7.37. Diferencias morfológicas en las curvas del canal 1 y 3 con fuerza vertical baja.....	99
Figura 7.38. (a) Influencia de la fuerza vertical (1,2 bar, 30 km/h, 6°); (b) del ángulo (1,2 bar, 10 km/h, 250 N); (c) de la velocidad (1,2 bar, 250 N, 8°) y; (d) de la presión (1,2 bar, 30 km/h, 8°) en el canal 1.....	99
Figura 7.39. Influencia de la fuerza vertical en la deformación a tracción en el canal 2 a 30 km/h y 1,2 bar.....	100
Figura 7.40. Influencia de la fuerza vertical en la (a) entrada y (b) salida de la huella de contacto en el canal 2 a 30 km/h y 1,2 bar.....	101
Figura 7.41. Influencia de la fuerza vertical en la salida de la huella de contacto en el canal 1 a 30 km/h, 1,2 bar.....	102
Figura 7.42. Influencia de la fuerza vertical en la entrada de la huella de contacto en el canal 3 para 30 km/h y 1,2 bar.....	102
Figura 7.43. Influencia de la fuerza vertical en el (a) canal 3 y (b) canal 5 a 4° y 20 km/h.....	103
Figura 7.44. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 3 a 250 N y 6°.....	104
Figura 7.45. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 5 a 250 N y 6°.....	104
Figura 7.46. Fuerza lateral en función del ángulo de deriva para distintas velocidades a 0,8 bar y 750 N.....	106
Figura 7.47. Fuerza lateral en función del ángulo de deriva para distintas presiones a 50 km/h y 750 N.....	106
Figura 7.48. Fuerza lateral en función del ángulo de deriva para distintas fuerzas verticales a 0,8 bar y 30 km/h.....	107
Figura 7.49. Desprendimiento de capas del neumático por efecto del sobrecalentamiento.....	108
Figura 7.50. Comportamiento de la fuerza lateral para distintas fuerzas verticales a 20 km/h.....	108
Figura 7.51. Comportamiento de la fuerza lateral para distintas velocidades a 1000 N.....	109

Figura 7.52. Influencia de la velocidad en la deformación del flanco del neumático en el canal 6 a 250 N y 4°.....	110
Figura 8.1. Esquema de un sistema Fuzzy Logic.....	116
Figura 8.2. (a) Conjunto recortado, (b) conjunto escalado [83].....	117
Figura 8.3. Las funciones de pertenencia para una variable genérica.....	118
Figura 8.4. Etapas para la toma de decisiones en Fuzzy Logic.....	119
Figura 8.5. (a) Interfaz de la herramienta de lógica difusa; (b) esquema de trabajo seguido para obtener las salidas.	120
Figura 8.6. (a) Set de reglas para estimar la fuerza vertical; (b) set de reglas para estimar la velocidad.	121
Figura 8.7. Funciones de pertenencia de la velocidad experimental para la variable de salida “velocidad”	121
Figura 8.8. Resultados de simulaciones de fuerza vertical para (a) 0,8 bar, (b) 1 bar y (c) 1,2 bar.....	123
Figura 8.9. Resultados de simulaciones de velocidad de giro para (a) 0,8 bar, (b) 1 bar y (c) 1,2 bar.....	124
Figura 8.10. (a) Esquema de funcionamiento; (b) interfaz de la herramienta de lógica difusa.....	126
Figura 8.11. (a) Set de reglas para estimar la fuerza vertical; (b) set de reglas para estimar el ángulo de deriva.	127
Figura 8.12. Resultados de la simulación de la fuerza vertical para (a) 10 km/h, 0,8 bar; (b) 30 km/h, 1 bar y (c) 50 km/h, 1,2 bar.....	128
Figura 8.13. Resultados de la simulación del ángulo de deriva a (a) 10 km/h, 0,8 bar; (b) 30 km/h, 1 bar y (c) 50 km/h, 1,2 bar.....	129
Figura 8.14. (a) Valores ambiguos en los datos de desplazamiento; (b) ejemplo del SDS para 1,2 bar, 250 N, 10 km/h.....	131
Figura 8.15. Modelo experimental de F_y en función de F_z y α para 30 km/h y 0,8 bar.	132
Figura 8.16. Implementación del modelo experimental de F_y para el desarrollo del SDS y la estimación del LFC.	133
Figura 8.17. Identificación del deslizamiento a partir de la estimación del ángulo de deriva.	133
Figura 8.18. Resultados de simulación de (a) F_z y (b) F_y	134
Figura 8.19. Estimación del LFC comparada con valores teóricos calculados.	135

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Las condiciones de trabajo en las que se ve envuelto un neumático son determinantes para el funcionamiento del mismo y, por tanto, del vehículo. Estas condiciones pueden venir impuestas por el propio vehículo, por ejemplo, el peso del mismo o el cambio de trayectoria a partir del giro del volante, o por agentes externos, como son el tipo de calzada o la temperatura ambiente. Sea como fuere, estos factores condicionan el rendimiento y la adherencia potencial de los neumáticos, haciendo que un conductor circule con un rango de seguridad mayor o menor en lo que a la posible pérdida de control del vehículo se refiere.

En los últimos años, debido al creciente interés por desarrollar vehículos más seguros, eficientes, y respetuosos con el medio ambiente, se ha acrecentado el interés por optimizar la utilidad de los neumáticos (haciendo neumáticos recauchutados o reciclándolos para otros usos) o por reducir el impacto medioambiental y la contaminación de los mismos (reduciendo las emisiones en los procesos de producción y la contaminación acústica que producen durante la rodadura) pero, sin duda, el campo que ha evolucionado con mayor auge entre los fabricantes de neumáticos es el de desarrollar neumáticos capaces de aportar información sobre las condiciones que lo rodean y mejorar su rendimiento así como el de los sistemas de seguridad activos del vehículo. Este neumático, junto con todas las posibilidades que puede ofrecer, se ha denominado históricamente bajo el nombre de “neumático inteligente”, el cual estaría provisto de sensores autoabastecidos energéticamente capaces de proporcionar información sobre el estado del mismo y los fenómenos que se producen en el contacto neumático-calzada.

En los últimos 30 años se han desarrollado investigaciones que han ofrecido propuestas para la consecución de este hito, pero han mostrado limitaciones importantes que han impedido su comercialización y su producción en masa. En general, los sensores basados en ondas acústicas superficiales (SAW – *Surface Acoustic Wave*) son los que evolucionaron en mayor medida las investigaciones iniciales realizadas en este campo. Con ellos se logró medir la deformación de los tacos de la escultura del neumático entre otras magnitudes físicas como la presión o la temperatura. El estudio más completo publicado hasta el momento, que además contó con el apoyo de un fabricante de neumáticos, fue el denominado Proyecto Apollo. En dicho proyecto, se evaluó el potencial del neumático inteligente y se realizaron estudios experimentales con sensores ópticos, piezoeléctricos y acelerómetros, analizando su potencial, ventajas e inconvenientes. Posteriormente, otras investigaciones utilizaron sensores de diversa índole para la obtención de información, desde sensores capacitivos a dispositivos como los MEMS (*Micro-Electro-Mechanical*

Systems) desarrollados en la época más reciente, demostrando que el neumático inteligente es una línea de investigación con gran proyección.

El gran número de trabajos publicados hasta el momento dentro del campo del neumático inteligente (no sólo en el campo de la obtención de información mediante sensores, sino también con el objetivo de alimentarlos energéticamente y transmitir la información) hacen de este campo de estudio uno de los más ambiciosos para la industria del automóvil.

En esta Tesis Doctoral, se utilizan técnicas extensométricas para la medida de deformaciones en la parte interna de la banda de rodadura, realizando ensayos en un banco de pruebas de neumáticos bajo condiciones controladas. El estudio se centra en demostrar el potencial de las bandas extensométricas para extraer información de las condiciones de trabajo del neumático a partir de las medidas de deformación, así como desarrollar un sistema para detectar la pérdida de adherencia del neumático en fase temprana a partir de la estimación del coeficiente de adherencia lateral solicitado en el contacto neumático-calzada.

1.2 Estructura de la Tesis Doctoral

La presente Tesis Doctoral consta de 10 capítulos, siendo el primero de ellos la presente introducción.

En el capítulo 2 se desarrolla un estado del arte sobre las técnicas utilizadas durante las últimas décadas para el desarrollo del neumático inteligente, haciendo especial hincapié en aquellas basadas en la medida de la deformación de la banda de rodadura.

En el capítulo 3 se exponen los objetivos de la Tesis Doctoral, así como las bases metodológicas utilizadas.

En el capítulo 4 se enumeran y describen dos fases experimentales llevadas a cabo para la consecución de los objetivos de la presente Tesis Doctoral, en las que se utilizaron neumáticos y condiciones de ensayo diferentes.

En el capítulo 5 se presentan los materiales y métodos utilizados en ambas fases experimentales, principalmente el banco de ensayo de neumáticos y los sensores, así como los equipos utilizados para la instrumentación de los neumáticos y la obtención de datos.

En el capítulo 6 se expone la metodología seguida para el análisis de los datos experimentales mediante el cual se han extraído las curvas representativas de los ensayos, y se describe brevemente la influencia de las condiciones de trabajo del neumático analizadas en la deformación de la banda de rodadura.

En el capítulo 7 se analizan los resultados obtenidos, dividiendo el análisis en condiciones de línea recta o paso por curva para los resultados obtenidos en cada fase experimental. Este análisis ha permitido conocer la influencia de las condiciones de ensayo en los puntos significativos de las curvas de deformación, los cuales guardan una relación estrecha con los parámetros de funcionamiento modificados durante los ensayos.

En el capítulo 8 se propone y desarrolla un sistema de detección del deslizamiento basado en los datos obtenidos en la primera fase experimental.

En los capítulos 9 y 10 se presentan las conclusiones obtenidas y se plantean las posibles vías de investigación abiertas en la presente Tesis Doctoral.

Capítulo 2

Estado del arte

En el presente capítulo se describe la necesidad de desarrollar un neumático inteligente para mejorar la seguridad del tráfico, así como los estudios realizados hasta el momento y la instrumentación utilizada. Además, se describen brevemente las magnitudes físicas que influyen en el comportamiento de los neumáticos y, por ende, en el contacto neumático-calzada, recopilando los sensores más utilizados para la medida de las mismas.

2.1 El neumático inteligente

Como el único medio de contacto entre el vehículo y la calzada, el neumático es un elemento clave en la dinámica de los vehículos y, por tanto, en la seguridad de los mismos.

En los últimos años el interés por los neumáticos ha ido en aumento, tanto para la sociedad como para la industria del transporte, principalmente debido al impacto que tienen en el confort, rendimiento, consumo de combustible y seguridad de los vehículos. Éste último es principal motivo para desarrollar un neumático que no sea sólo un componente pasivo, sino un sistema que forme parte de los sistemas activos de control del vehículo. Este propósito, con todo lo que conlleva, se ha englobado en los últimos años bajo el término “neumático inteligente”.

Debido a las características del contacto neumático-calzada, la relación entre las fuerzas generadas sobre el neumático en los procesos de aceleración o frenado y el deslizamiento de los mismos no es lineal. Como consecuencia, es difícil aplicar en el pedal de freno la fuerza óptima para detener el vehículo en una distancia mínima, siendo prácticamente imposible si las condiciones de la calzada no son adecuadas, por ejemplo, en caso de lluvia, barro, o hielo, donde la adherencia es considerablemente menor [1]. En situaciones de paso por curva el control del vehículo puede ser aún más difícil si éste acelera o frena, sea cual sea el estado de la calzada. Es, por tanto, un objetivo prioritario controlar el comportamiento de los neumáticos hasta el punto de determinar el límite de adherencia y, por tanto, los límites de control del vehículo.

En general, el objetivo último de las investigaciones realizadas sobre el neumático inteligente es monitorizar en tiempo real los parámetros que influyen en la adherencia potencial del neumático, como las fuerzas generadas en el contacto neumático calzada, la longitud de la huella de contacto, el coeficiente de fricción, el ángulo de deriva, las condiciones de la calzada, el desgaste del neumático, etc. Con la monitorización de estos parámetros, el neumático inteligente podría proporcionar esta información a los diferentes sistemas de control activo que actualmente equipan la mayoría de vehículos, como el ABS (*Anti-lock Braking System*), el TCS (*Traction Control System*), el ESC (*Electronic Stability Control*) o el SCS (*Suspension Control System*), mejorando su rendimiento y ayudando a prevenir accidentes de tráfico.

Por tanto, la inteligencia del neumático reside en la capacidad de conductores y sistemas de control del vehículo de aprovechar la información proporcionada por el neumático instrumentado y de la capacidad del mismo para contribuir en la toma de decisiones. En la Figura 2.1 se muestra el proceso mediante el cual el neumático inteligente podría interactuar con el resto del vehículo y sus potenciales beneficios. Básicamente, el neumático, provisto de sensores, proporcionaría datos que, tras su procesamiento, podrían ser utilizados por los sistemas de control o para estimar distintos parámetros que influyen crucialmente en el comportamiento de los neumáticos y la dinámica vehicular.

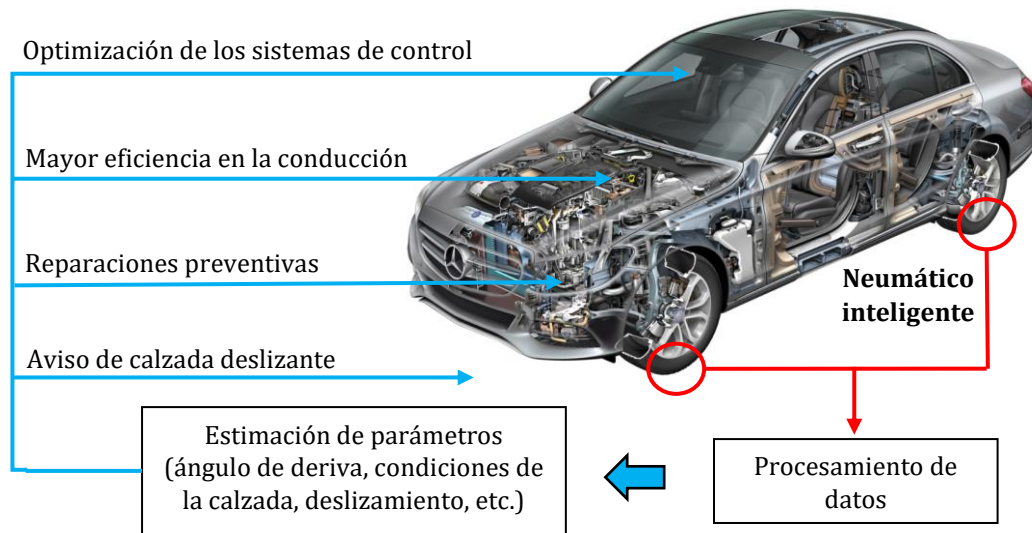


Figura 2.1. Potenciales beneficios del neumático inteligente.

2.1.1 Necesidad y potencial del neumático inteligente

Como se ha comentado anteriormente, el principal objetivo del neumático inteligente es contribuir de forma activa a mejorar la seguridad del tráfico. En este apartado se proporciona un resumen de los factores de riesgo relacionados con los neumáticos y la importancia que tienen en los accidentes de tráfico. El máximo potencial del neumático inteligente es evitar los accidentes cuya causa principal son los neumáticos (desgaste, pinchazo, reventón, etc.) o lo que les rodea (calzada deslizante, frenadas de emergencia, etc.) y mejorar el funcionamiento de otros sistemas que contribuyen a la seguridad.

Durante el año 2014, entre los vehículos implicados en accidentes que evidenciaron algún tipo de anomalía en su estado, aproximadamente el 45% mostraron neumáticos que estaban defectuosos, muy desgastados, o que sufrieron un reventón. Es decir, casi el 50% de los accidentes causados por fallos mecánicos del coche son a causa del mal estado de los neumáticos [2].

Según un estudio de accidentalidad publicado en 2011 por la Fundación Española para la Seguridad Vial (FESVIAL) [3], un 0,33% del total de los vehículos implicados en accidentes de tráfico tenían neumáticos en mal estado. Sin embargo, esta cifra aumenta hasta casi el 1% si sólo se consideran los accidentes mortales, por lo que, en caso de accidente, el riesgo de que sea mortal se triplica si los neumáticos están defectuosos en comparación con cualquier otro defecto del vehículo. Aunque pueda parecer una cifra menor, implica que el mal estado de los neumáticos fue parte de las causas de más del 70%

de los accidentes mortales con vehículos en mal estado y que más de 200 personas fallecieron entre 2003 y 2007 debido al estado de los neumáticos.

Tras la distracción y el sueño, en comparación con otras causas de accidente, los neumáticos son el factor de accidentalidad más importante en autopistas. En 2008, más del 17% de los heridos graves se produjeron por causa de vehículos con problemas en los neumáticos, ascendiendo al 26% en el caso de fallecidos.

En cuanto a las condiciones meteorológicas que podrían acentuar la influencia de los neumáticos en los accidentes de tráfico, España no se considera un país cuya meteorología pueda suponer un problema añadido. Sin embargo, en algunos países el número de accidentes debidos a condiciones meteorológicas adversas (lluvia, nieve, etc.) es significativo. En un estudio realizado en Finlandia entre 1998 y 2001 [4], se demostró que los neumáticos son una de las principales causas de accidentes de tráfico por pérdida de control del vehículo. Para el estudio se evaluaron las causas de más de 1000 accidentes de tráfico, concluyendo que, de media, los neumáticos fueron un factor de riesgo en más del 15% del número total de accidentes con víctimas mortales, produciéndose más del 10% con neumáticos defectuosos o inadecuados para las condiciones meteorológicas existentes (lluvia, nieve o hielo). Todos los estudios concluyen que el cuidado de los neumáticos tiene un gran potencial para prevenir accidentes, y que la combinación de distintos factores de riesgo (condiciones meteorológicas adversas, defectos en los neumáticos, etc.) juega un papel crucial en los accidentes de tráfico.

Aunque es imposible calcular una cifra exacta de los beneficios que tendría para la seguridad vial la utilización del neumático inteligente, resulta evidente que, mediante la estimación de la adherencia potencial o la monitorización del estado del neumático, éste daría la posibilidad a los conductores de adaptar el modo de conducción en tiempo real, y proporcionaría información a los sistemas de control para mejorar su efectividad en situaciones de riesgo. En el Proyecto Apollo [5] se estimó que el número de víctimas mortales por accidentes de tráfico se podría reducir en un 10% si todos los vehículos estuvieran equipados con sistemas de neumáticos inteligentes, lo que significaría que se podrían salvar más de 4.000 vidas al año en la Unión Europea. Por otro lado, resulta evidente que el tráfico en carretera, así como la conservación y reparación del estado del vehículo y la calzada, mejoran cuando la conducción se adapta al estado del vehículo o la carretera.

2.1.2 Sistemas implementados, tendencias, objetivos y problemática del neumático inteligente

El tráfico libre de accidentes es el objetivo último de la industria automovilística. Sin embargo, la seguridad del tráfico depende no sólo de la mejora de los sistemas y subsistemas de los vehículos (como los neumáticos, la suspensión, o la dirección), sino también de su interacción y cooperación (ver Figura 2.2). Los vehículos inteligentes podrían ser fuentes emisoras y receptoras de información, previniendo accidentes y mejorando el tráfico. Para conseguirlo, las investigaciones se centran en hacer los sistemas y subsistemas del vehículo más inteligentes, dotándoles de nuevas capacidades para adquirir, controlar y evaluar información en tiempo real para la toma de decisiones. En este sentido, se pretende evitar que, debido a la escasez de información, se produzcan actuaciones incorrectas de los conductores o los sistemas de control.

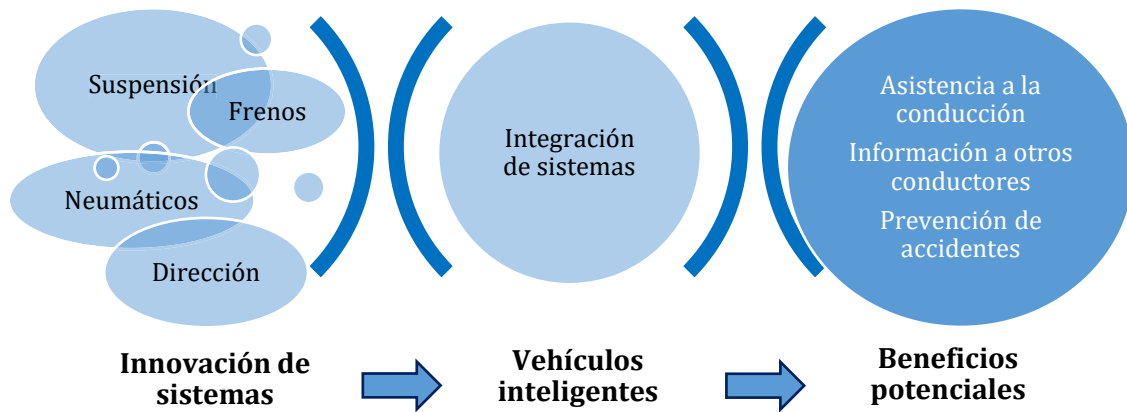


Figura 2.2. Innovación, integración e interacción de sistemas para conseguir un tráfico sin accidentes.

➤ Sistemas implementados

Posiblemente, los neumáticos sean el subsistema con el que se puedan obtener mayores beneficios, puesto que son el único elemento en contacto con la calzada y, por tanto, responsables directos de la adherencia de los vehículos.

En las tres últimas décadas se han conseguido avances para la consecución del neumático inteligente. El primer hito en el campo de los neumáticos inteligentes es el *Tyre Pressure Monitoring System* (TPMS), patentado en 1985 [6], que sirve para controlar la presión de inflado de los neumáticos en tiempo real, convirtiéndolo en un sistema de seguridad activo. Existen dos posibles soluciones para la utilización del TPMS: directo e indirecto. Por un lado, el TPMS directo consta de un sensor colocado en cada rueda que mide y transmite el dato de la presión de inflado a una centralita que informa al conductor sobre las variaciones de presión. Esta solución tiene el inconveniente de que los sensores necesitan una fuente de alimentación (normalmente una batería). Además, suelen ser necesarias operaciones de mantenimiento para calibrarlos cuando se cambian los neumáticos. En cuanto al TPMS indirecto, no emplea sensores para medir la presión, sino que utiliza los sensores de velocidad de giro del ABS para, en función de la variación en el diámetro de los neumáticos, determinar si el neumático está desinflado. Como principal desventaja, el TPMS indirecto no proporciona un valor concreto de la presión, sino que identifica cuándo hay un problema grave en el neumático (caída drástica de la presión). Además, en caso de falta de adherencia, puede dar lugar a mediciones erróneas. Aun así, en 2002 se aprobó en EEUU (en 2009 en la UE) que el TPMS fuera un sistema obligatorio para todos los vehículos nuevos [7], ya que sus imprecisiones no pueden llegar a resultar en accidentes fatales y en la mayoría de situaciones la información que proporcionan es de gran utilidad. Aunque los sistemas TPMS aumentaron la seguridad de los vehículos, la información con respecto al contacto neumático-calzada y sus características sigue siendo escasa. Por este motivo, la monitorización de parámetros de influencia en el comportamiento de los neumáticos y el contacto neumático-calzada ha sido el principal objetivo de los trabajos realizados hasta el momento.

Desde el desarrollo e implantación del TPMS se esclarecieron los obstáculos a superar para la consecución del neumático inteligente, destacando fundamentalmente tres: la magnitud física a medir y los sensores a utilizar; la alimentación de los mismos; y la transmisión de información desde el neumático al resto del vehículo, que debe ser inalámbrica.

➤ Tendencias

A la hora de elegir qué sensor utilizar, es fundamental conocer previamente el parámetro a medir y la estrategia a seguir para prever qué sensor puede aportar información sobre el comportamiento dinámico del neumático. En la Figura 2.3 se muestran esquemáticamente las estrategias planteadas en el Proyecto Apollo [5] para la obtención de información, relacionando las posibles implicaciones de parámetros como la fuerza (en las tres direcciones principales), la fricción o el ángulo de deriva en la deformación local de la banda de rodadura, los efectos globales que podrían tener en la llanta, el par autoalineante o los cinturones metálicos del neumático y otras posibles implicaciones sobre factores como el ruido o la aceleración lateral del vehículo.

	DEFORMACIÓN LOCAL	EFFECTOS GLOBALES	OTROS
Fuerza vertical	<div>Integración de la distribución de la presión en la calzada</div> <div>Identificación de la longitud de la huella de contacto mediante la deformación de los tacos</div>	<div>Distancia a la llanta y los cinturones del neumático</div> <div>Determinación de la longitud de la huella de contacto basándose en la deformación de los cinturones</div>	<div>Determinación del rebote y tiempo de estabilización</div> <div>Aplicación de bandas extensométricas</div>
Fuerza lateral	<div>Deformación de la banda de rodadura</div> <div>Determinación del gradiente de deformación y el punto de rotura basados en el post-procesamiento del modelo</div>	<div>Determinación de la deformación longitudinal de los cinturones y la rotación relativa a la llanta</div>	<div>Evaluación de la tracción e información del sistema de frenada</div> <div>Aplicación de bandas extensométricas</div>
Fuerza longitudinal	<div>Deformación de la banda de rodadura</div> <div>Determinación del gradiente de deformación y el punto de rotura basados en el post-procesamiento del modelo</div>	<div>Determinación de la deformación longitudinal de los cinturones y la rotación relativa a la llanta</div>	<div>Evaluación de la aceleración lateral y guiñada del vehículo</div> <div>Aplicación de bandas extensométricas</div>
Fricción	<div>En curva: determinación del punto de transición de la adhesión al deslizamiento</div> <div>En recta: determinación de la deformación longitudinal</div>	<div>En curva: post-procesamiento de la fuerza lateral y el par autoalineante</div> <div>En recta: evaluación de las revoluciones de la rueda en rodadura libre y con carga</div>	<div>Evaluación de información secundaria (por ejemplo, el ruido)</div>
Ángulo de deriva	<div>Determinación del gradiente de deformación lateral a lo largo de la huella de contacto</div>	<div>Evaluación de la fuerza lateral y el par autoalineante</div>	<div>Evaluación de la aceleración lateral y la guiñada del vehículo</div>

Figura 2.3. Estrategias planteadas para la consecución del neumático como una fuente de información.

Como idea principal, cabe destacar que todos los parámetros implicados en las distintas estrategias a seguir afectan o están afectados (directa o indirectamente) por la deformación de la banda de rodadura del neumático.

➤ Objetivos

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo del neumático inteligente es contribuir de forma activa a la seguridad de los vehículos. Sin embargo, este objetivo es tan ambicioso como general. En 2005 se pusieron encima de la mesa los hitos alcanzados en la seguridad y el confort de los vehículos, así como los objetivos a alcanzar en los que el neumático inteligente podría tener un papel crucial [5].

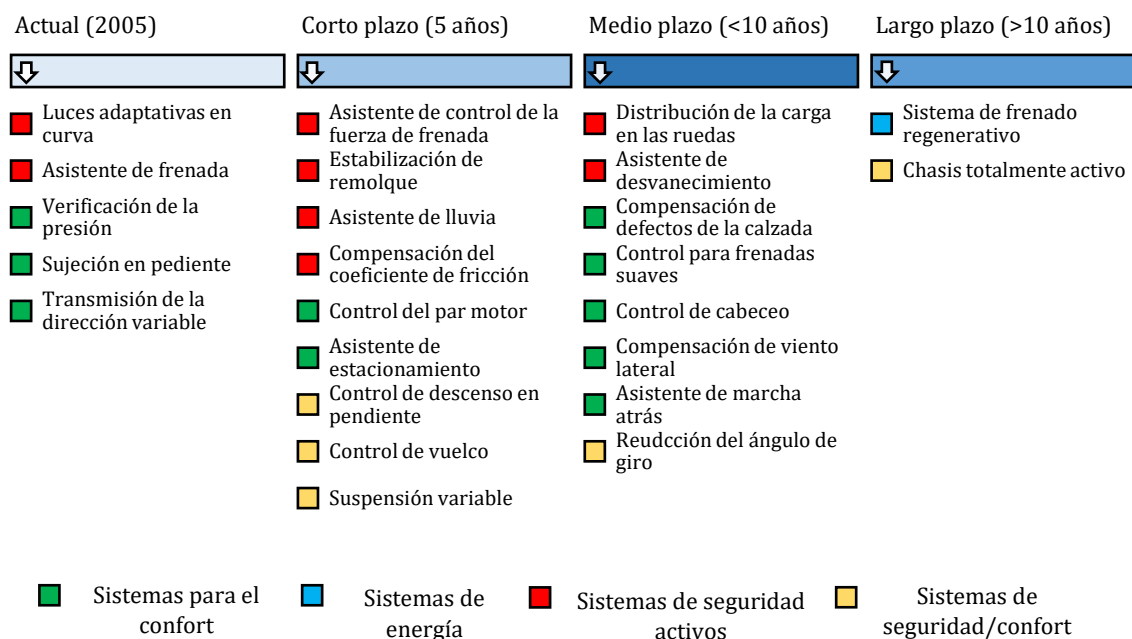


Figura 2.4. Influencia del desarrollo del "neumático inteligente" en retos a alcanzar en 2005 [5].

Se puede ver que, aunque algunos de ellos se han conseguido lograr en un tiempo razonable (por ejemplo, el asistente de estacionamiento), la mayoría no se han logrado en el tiempo previsto. Además, es evidente el impacto variado que podría tener el neumático inteligente, desde proporcionar información de las fuerzas y la fricción en la huella de contacto para mejorar la seguridad de los vehículos, hasta predecir defectos en el neumático y evitar accidentes.

2.2 Estudios previos

2.2.1 Avances en el desarrollo del neumático inteligente

Aunque los primeros estudios para mejorar el rendimiento de los neumáticos mediante el estudio de sus propiedades y condiciones de funcionamiento datan del siglo XIX, los primeros trabajos de investigación publicados bajo el concepto "neumático inteligente" datan de finales de los años 90. Éstos se centraron en lograr el que se ha considerado siempre el objetivo último del neumático inteligente: determinar el límite de adherencia del neumático a partir de la medición de parámetros físicos como la presión, la

temperatura o el desgaste del mismo para monitorizar la fricción en tiempo real. En la Figura 2.5 se muestran los hitos a conseguir desde la implantación del TPMS en adelante.

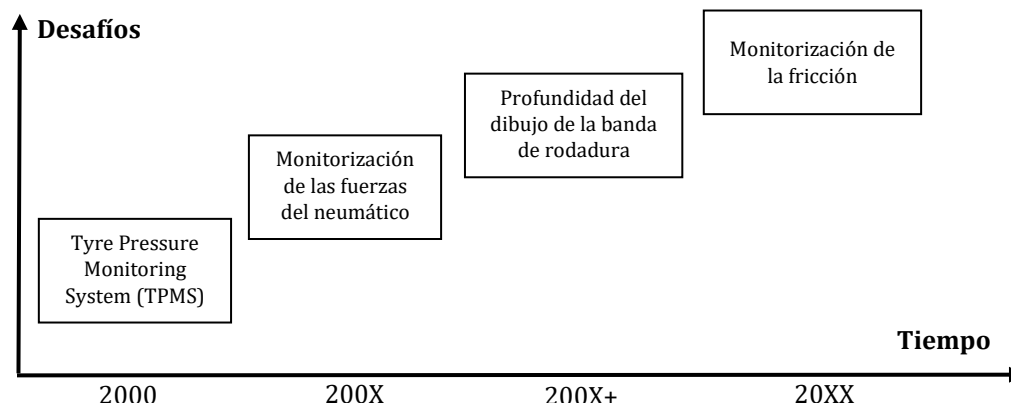


Figura 2.5. Estado del arte propuesto sobre los hitos (TPMS) y aplicaciones futuras del neumático inteligente [5].

En cualquier caso, el mayor obstáculo de las investigaciones llevadas a cabo no ha sido sólo embarcar sensores en un sistema tan complejo como es el neumático, que está en continuo movimiento, sino también conseguir relacionar los diferentes parámetros físicos del neumático con las condiciones de funcionamiento del mismo. Esto es así, en gran parte, porque el neumático no es un sistema que se comporte de forma lineal.

Los resultados de uno de los primeros experimentos en referencia directa con el neumático inteligente fueron publicados en 1999 por Pohl *et al.* [8,9], quien instaló sensores basados en ondas acústicas superficiales (SAW – *Surface Acoustic Wave*) sobre la superficie interna de la banda de rodadura para monitorizar distintos parámetros. Mediante estos sensores midió la deformación de los tacos de la escultura del neumático, que están en contacto directo con la calzada, corroborando que, cuando la superficie está mojada, la deformación de los tacos disminuye, ya que la fricción en el contacto también lo hace. Por otro lado, concluyó en su estudio que la deformación de la banda de rodadura en contacto con la calzada (es decir, la huella de contacto) depende fundamentalmente de la presión y de la fuerza vertical a la que esté sometido el neumático (además de los distintos parámetros mecánicos del sistema de suspensión) y no tanto de la velocidad de giro del neumático. Finalmente, se destacaron como puntos de estudio de mayor interés los que no están situados en la línea media de la banda de rodadura, ya que éstos están sometidos a esfuerzos transversales adicionales durante el contacto. Los buenos resultados proporcionados por los sensores de ondas acústicas superficiales han propiciado posteriormente múltiples estudios, demostrando ser capaces de medir no sólo la deformación del neumático [10] sino también otros parámetros como la presión o la temperatura [11].

En ese mismo año, el fabricante alemán Continental Tire presentó un sensor de torsión denominado “SWT” (*Side Wall Torsion*) capaz de medir la deformación en los flancos del neumático y estimar las fuerzas que intervienen en el contacto neumático-calzada. La idea inicial era que el sistema fuera comercializado en masa a partir de 2002, aunque afirmaron que para eso quedaba mucho trabajo por delante, lo cual ha quedado demostrado, ya que a día de hoy todavía no se ha implantado por motivos que se desconocen. Entre los beneficios potenciales se previó que el sistema sería capaz de reducir las distancias de frenado y medir la velocidad angular de la rueda para ahorrar el equipamiento de los

sensores *yaw-rate* (también denominados *encoders*) que utilizan los sistemas actuales de ABS [12,13].

Otra investigación destacada fue la que se llevó a cabo en la *Darmstadt University of Technology*, que consistió en el desarrollo de un sistema mediante sensores tipo Hall para medir la deformación en la banda de rodadura a partir de la posición relativa de un imán instalado en la superficie interior de la misma con respecto a cuatro sensores dispuestos cada 90°. Mediante esta aplicación se pretendían mejorar múltiples aspectos, como la distancia y estabilidad en la frenada, el confort, o los avisos de peligro al conductor [14]. Tres años más tarde, Yilmazoglu *et al.* [15] utilizó también sensores tipo Hall dispuestos en la llanta para medir la deformación de la banda de rodadura en 3D, obteniendo la posición del sensor como una combinación lineal de las tres direcciones principales de medida. Los sensores utilizados demostraron tener más sensibilidad magnética, menor consumo de energía y ser más estables con los cambios de temperatura que los utilizados anteriormente.

De 2002 a 2005 se desarrolló en Finlandia uno de los mayores proyectos desarrollados hasta la fecha en el campo de los neumáticos inteligentes, el Proyecto Apollo [5]. En él, aparte de realizar un estudio sobre la necesidad de desarrollar un neumático inteligente que contribuya activamente a la seguridad de los vehículos, se valoró la idoneidad de distintos sensores para la medida de parámetros físicos del neumático, así como la alimentación de los mismos y la transmisión inalámbrica de datos del neumático al vehículo.

En primer lugar, mediante el análisis por el MEF (Método de los Elementos Finitos) del neumático, concluyeron que los puntos de mayor interés para monitorizar parámetros físicos como la aceleración son aquellos situados a ambos lados de la línea media de la banda de rodadura, especialmente cuando los parámetros se miden en dirección lateral, ya que la señal proporciona un valor de *offset* distinto para cada situación, estando éste en función de la posición axial, el perfil de la banda de rodadura y la deformación del neumático en condiciones dinámicas [5].

Además de la posición de los sensores, otros parámetros como la presión, la velocidad, la fuerza vertical y el ángulo de deriva del neumático influyeron proporcionalmente en la aceleración resultante, especialmente en los valores máximos a la entrada y salida de la huella de contacto y el valor del *offset*. Por último, concluyeron también que la profundidad de la banda de rodadura no afectaba significativamente a los resultados de la simulación, pudiendo instalar por tanto los sensores en la superficie interna de la banda de rodadura sin necesidad de embeberlos en las capas del neumático.

Posteriormente se realizó el estudio experimental, en el que, tras evaluar el potencial de diferentes sensores, se eligieron tres para instrumentar un neumático, midiendo en los tres ejes principales: sensores ópticos, piezoeléctricos y acelerómetros.

Los sensores ópticos permitieron medir los desplazamientos entre los puntos de colocación de los sensores y la llanta, siendo el punto de mayor interés aquel en el que la parte del neumático donde está colocado el sensor está pasando sobre la huella de contacto. De este modo, se estableció una relación entre las fuerzas exteriores del neumático y la señal de desplazamiento. Del mismo modo, se evaluó el potencial de los acelerómetros y los sensores de deformación en relación con el giro de la rueda. A diferencia de la aceleración, los resultados de deformación eran independientes del cambio de velocidad, aunque ambos sensores mostraron cambios con la variación de la fuerza vertical. Aunque se logró obtener información sobre diferentes parámetros, la medición de muchos de ellos quedó por

resolver, como la fricción potencial, el desgaste, las condiciones de la calzada o la predicción de daño catastrófico del neumático. También se concluyó que la robustez de los sensores ópticos y piezoeléctricos no parecía ser suficiente para desarrollar el “neumático inteligente”, y que la medición de la fricción potencial estaba fuera del alcance de los acelerómetros.

El Proyecto Apollo supuso un punto de inflexión en el interés por desarrollar el “neumático inteligente”, y en los años posteriores se desencadenaron múltiples investigaciones. En 2003, Todoroki *et al.* [16] utilizaron los alambres del neumático como electrodos, embebiendo un pequeño circuito oscilador para monitorizar los cambios en la capacitancia al comprimirse los alambres y el caucho del neumático. En 2004, Tjiu *et al.* [17] utilizaron la tecnología MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) incluyendo sensores de presión, temperatura y acelerómetros para monitorizar las condiciones de trabajo del neumático. Más tarde, Braghin *et al.* [18] utilizaron acelerómetros MEMS triaxiales en la superficie interior de la banda de rodadura, correlacionando las medidas de aceleración con un análisis mediante el MEF. Con estas medidas afirmaron obtener parámetros como el ángulo de deriva y la fuerza vertical. En 2005, Holtschulze *et al.* [19] desarrolló un modelo simplificado basado en el modelo de cerdas propuesto inicialmente por Fromm y Julien en los años 40 [20].

Desde 2005 hasta 2008, Matsuzaki y Todoroki [21-23] realizaron diversos estudios tomando la deformación del neumático como el parámetro a medir. Para ello, utilizaron sensores capacitivos en una sección de neumático, de forma que los alambres de las capas del neumático realizaban la función de electrodos y la deformación del neumático provoca un cambio en la capacitancia del mismo. De este modo, se obtuvieron resultados satisfactorios para la estimación de la deformación del neumático a partir de la frecuencia registrada en el circuito. Posteriormente, se utilizaron esos datos para establecer relaciones entre los datos de deformación y algunos parámetros mecánicos de los neumáticos como el par de frenada, el radio efectivo del neumático, la fuerza vertical o la longitud de la huella de contacto. Finalmente, propusieron utilizar la deformación del neumático como fuente de información para prevenir el estado de la calzada y optimizar el control de la frenada y sugirieron que la fuerza vertical se podía estimar utilizando los valores máximos de compresión y el par de frenada, pudiendo obtener el coeficiente de fricción mediante la ratio entre esos parámetros. Los sensores capacitivos han sido utilizados en múltiples investigaciones con resultados satisfactorios [24].

En 2005, Miyoshi *et al.* [25] patentaron un sistema mediante sensores magnéticos de deformación basado en la variación del flujo magnético y la deformación del neumático para la estimación de fuerzas.

En 2006 se lograron, al igual que con los sensores capacitivos [26], resultados prometedores de la deformación de la banda de rodadura utilizando bandas extensométricas. Morinaga *et al.* [27] sugirió el potencial de instalar bandas extensométricas en la parte interna de la banda de rodadura, obteniendo algunos resultados sobre las fuerzas generadas en el contacto neumático-calzada, aunque en este caso, los sensores no se embebieron en el propio neumático.

En 2008, Tuononen [28] utilizó, al igual que en el Proyecto Apollo, sensores ópticos para medir desplazamientos longitudinales y laterales en la banda de rodadura instalando el sensor en la llanta. A partir de los resultados se obtuvo un modelo para calcular la fuerza vertical, aunque se comprobó que la variación del desplazamiento con la fuerza vertical era prácticamente lineal, pudiendo calcular ésta a partir del desplazamiento. Además, la señal de desplazamiento lateral demostró tener potencial para calcular fuerzas laterales. Éstos

resultados fueron comparados con las medidas realizadas en un banco de ensayos de neumáticos, mostrando buena correlación. A pesar de los buenos resultados, los sensores mostraron una serie de desventajas, destacando que en situaciones de aceleraciones o frenadas bruscas el neumático puede desplazarse con respecto a la llanta de forma que el sensor deja de medir con respecto al mismo punto de referencia.

En ese mismo año, Yi *et al.* [29] utilizó sensores piezoeléctricos para medir la deformación en la parte interna de la banda de rodadura, analizando las características de fricción en el contacto neumático-calzada.

Tanto el número de publicaciones en la última década como la utilización de nuevas metodologías para hacer del neumático una fuente de información evidencian que la consecución del neumático inteligente sigue siendo un objetivo prioritario para la industria automovilística. En el campo de los sensores piezoeléctricos destaca el llevado a cabo por Erdogan *et al.* [30], quienes publicaron en 2010 una investigación para estimar el ángulo de deriva. El parámetro medido fue la deformación de los flancos del neumático. La pendiente de la curva de deformación lateral en la huella de contacto fue utilizada para estimar el ángulo de deriva. Los resultados se compararon con los datos proporcionados por una cámara digital tras realizar el procesamiento de imágenes, mostrando buena concordancia. En general, parámetros como la velocidad de giro, la presión o la fuerza vertical y su influencia en el rendimiento del neumático es el objeto de estudio de la mayor parte de investigaciones realizadas hasta el momento [31-33].

En la Figura 2.6 se muestran cronológicamente los principales hitos en la consecución del neumático inteligente así como los sensores utilizados y los parámetros medidos.

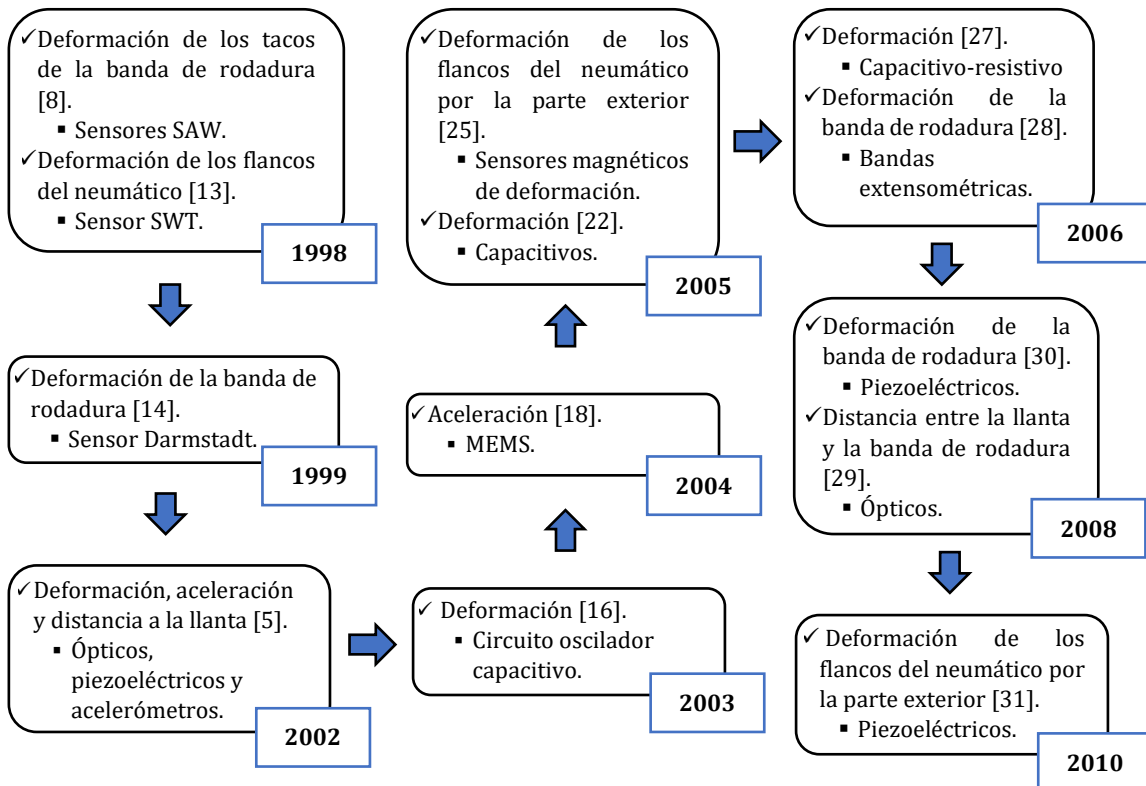


Figura 2.6. Cronología reciente de las investigaciones más destacadas para el desarrollo del neumático inteligente.

2.2.2 Sensores utilizados para medir la deformación del neumático

De la literatura estudiada se extrae la conclusión de que el desarrollo del neumático inteligente no se limita al estudio de un sólo parámetro ni a la utilización de un único tipo de sensor, sino que cada estudio utiliza distintos sensores y técnicas diferentes para monitorizar parámetros como la deformación [34-36], la temperatura [11,37] u otra magnitud física para estimar la fricción y, en consecuencia, contribuir a mejorar la seguridad de los vehículos y sus prestaciones. En este sentido, la estimación de la fricción se ha considerado como el objetivo más ambicioso del neumático inteligente. Existen principalmente dos métodos para estimar el coeficiente de fricción: indirectos y directos. Los métodos indirectos monitorizan parámetros como la velocidad del vehículo o las fuerzas aplicadas al neumático (es decir, magnitudes que no están directamente relacionadas con los procesos de fricción del neumático) para determinar a partir de ellos el coeficiente de fricción [38]. Por otro lado, los métodos directos consisten en medir magnitudes físicas que están directamente relacionadas con la fricción del neumático y el contacto neumático-calzada, como las fuerzas, la deformación u otros que intervienen en el comportamiento del vehículo.

En la Figura 2.7 se muestra la clasificación de los métodos más utilizados en estudios anteriores para estimar la fricción [39].

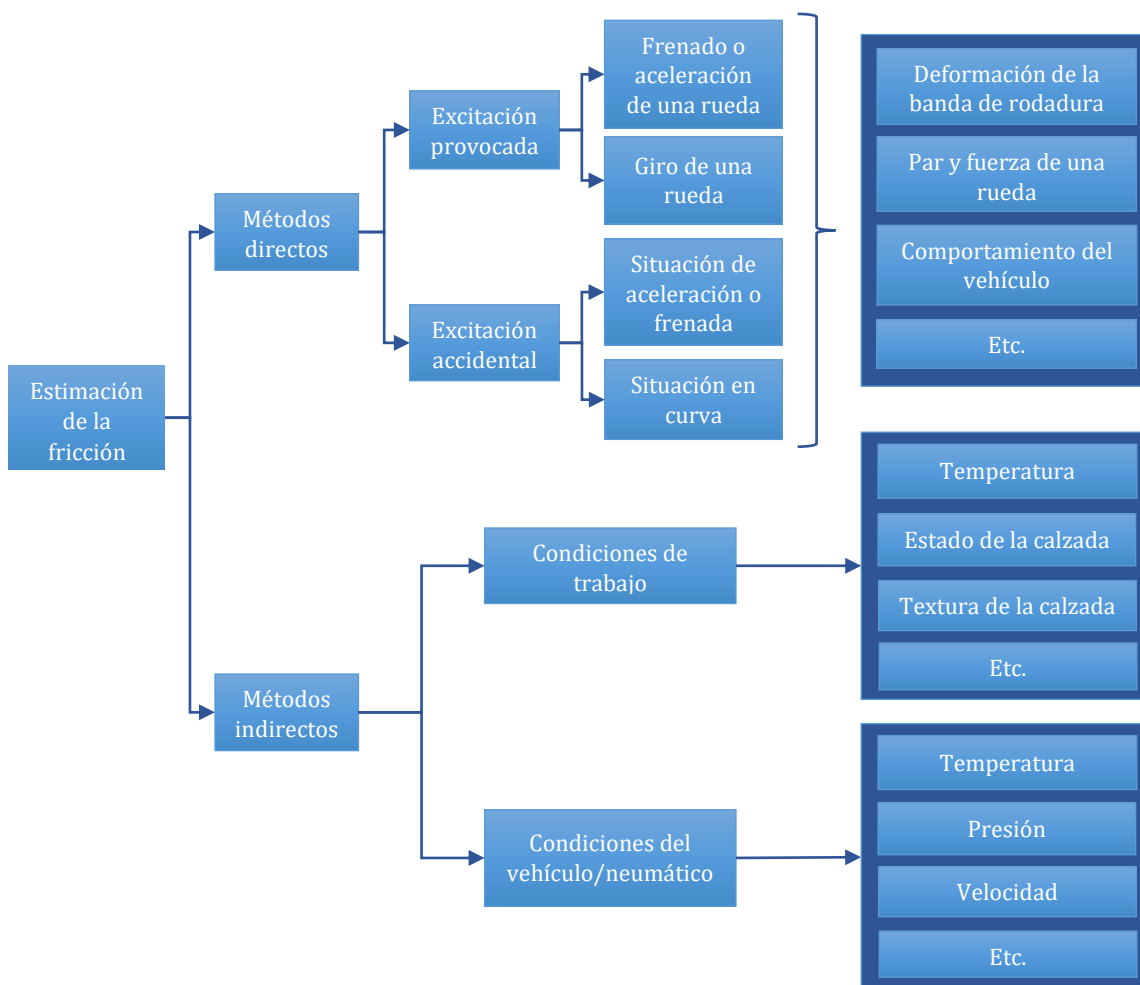


Figura 2.7. Clasificación de métodos utilizados en estudios previos para estimar la fricción.

Como se muestra, los métodos directos se dividen en función de si la excitación es provocada (es decir, está controlada por un sistema de control en condiciones de laboratorio), o si es accidental. En cualquier caso, los estudios recientes se han centrado principalmente en la medición de la deformación o aceleración de la banda de rodadura (tanto en la parte exterior como en la interior), el par y la fuerza generados por la rueda (en este caso se suele considerar el neumático y la rueda como un conjunto) y el comportamiento dinámico del vehículo, incluyendo la medición de magnitudes como la aceleración, la velocidad angular, etc.

En cuanto a los métodos indirectos, se basan en la medición de parámetros que no están directamente relaciones con el proceso de fricción, pero de algún modo están relacionados con él. Por lo tanto, la estimación de la fricción mediante estos métodos no es tan buena como en el caso de los métodos directos. Entre los factores tenidos en cuenta se encuentran las condiciones de trabajo externas del neumático y del vehículo, donde se consideran parámetros como la temperatura de la calzada, su estado (seco, mojado, etc.), y la calidad o textura de la misma (microtextura, macrotextura, etc.). Por otro lado, frecuentemente se ha intentado aprovechar el conocimiento del estado del vehículo y el neumático para estimar la fricción. Entre los parámetros más recurrentes se encuentran la temperatura, la presión de inflado del neumático o la velocidad. Sin embargo, se considera que la influencia de estos factores en la fricción potencial es reducida en comparación con la fuerza vertical o el ángulo de deriva.

Además, las técnicas de los diferentes métodos pueden dividirse en dos categorías: intrusivas y no intrusivas. Se consideran intrusivas aquellas que necesitan manipular el neumático o los sensores están directamente instalados en él, mientras que en las no intrusivas están comúnmente instalados en la llanta.

Como la técnica utilizada en presente Tesis Doctoral se engloba dentro del estudio de la deformación de la banda de rodadura, en la Figura 2.8 se esquematizan las técnicas más utilizadas para dicho fin.

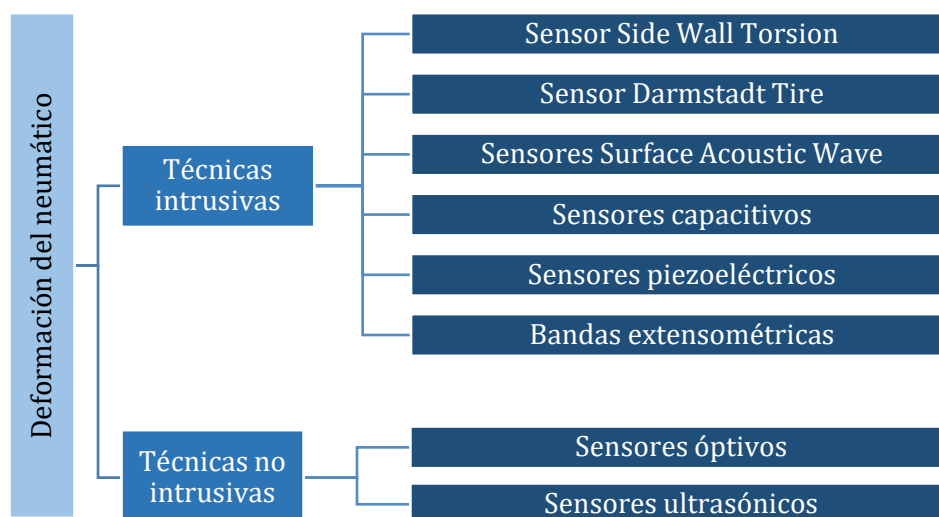


Figura 2.8. Resumen de técnicas utilizadas para la medida de deformaciones en la banda de rodadura.

Como se observa, las técnicas intrusivas son las más utilizadas. Sin embargo, no todas miden la deformación en la zona de la banda de rodadura, sino que algunas de ellas lo hacen en los flancos e incluso en los tacos del neumático, estando muy equilibrado el número de investigaciones entre las técnicas intrusivas y no intrusivas. A continuación, se describen brevemente los sensores y técnicas que destacan por su innovación o frecuencia de uso para estudiar ese parámetro.

Como se muestra en la Figura 2.8, la mayoría de técnicas utilizadas se engloban dentro de las técnicas intrusivas, las cuales se basan en instalar los dispositivos de medida directamente en el neumático. Como las bandas extensométricas han sido los sensores utilizados para la realización de la presente Tesis, en la siguiente sección se resumen las principales técnicas intrusivas utilizadas hasta el momento.

2.2.2.1 Técnicas intrusivas

➤ Side Wall Torsion (SWT)

El sensor de torsión de los flancos del neumático (SWT) [40] lleva siendo desarrollado por el fabricante alemán Continental desde el año 2000. El sensor mide la deformación en los flancos ocasionada tanto por las fuerzas longitudinales como laterales. Este sensor utiliza dos sensores de campo magnético montados en el chasis de los vehículos orientados perpendicularmente a los flancos del neumático para medir sus diámetros. La principal característica del neumático es que lleva incorporadas dos bandas magnéticas en la parte interior de los flancos en dos diámetros distintos, utilizando campos magnéticos y alternando los polos norte y sur para la magnetización del neumático, como se muestra en la Figura 2.9.

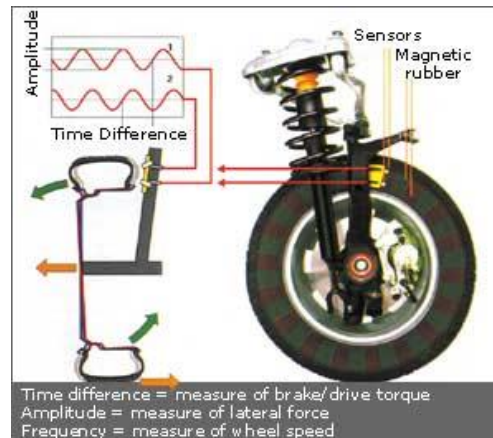


Figura 2.9. Sidewall Torsion Sensor (SWT) y magnetización de los flancos del neumático [40].

Los sensores miden una señal proporcional al campo magnético de cada uno de los polos. Si no se aplican fuerzas longitudinales, la alternancia entre los polos se produce simultáneamente en ambos sensores. La amplitud de la señal se corresponde a la medida de la fuerza lateral, la frecuencia con la velocidad de giro, y el desfase entre las señales con el par en los procesos de aceleración o frenada, ya que el campo magnético máximo pasa en instantes diferentes por cada sensor, lo que se traduce en una diferencia de fase entre las señales de los mismos.

En condiciones de paso por curva, las fuerzas laterales actuantes en el neumático debido a la fuerza centrífuga afectan a la transferencia de masa del vehículo. Esto provoca la deflexión de los flancos del neumático y, por tanto, que la distancia entre los sensores colocados en el flanco varíe. Dependiendo de cómo sea el comportamiento, la intensidad del campo magnético cambia. Mediante el SWT se logran medir las fuerzas actuantes en el contacto neumático-calzada gracias a que los fenómenos magnéticos son conocidos, están ampliamente probados y son estables.

Aunque las perspectivas del SWT eran buenas, los desarrolladores encontraron principalmente dos problemas. En primer lugar, la distancia entre la colocación del sensor

en el chasis y los flancos del neumático magnetizado, ya que la parte superior del neumático (el lado diametralmente opuesto a la huella de contacto) también sufre pequeñas deformaciones durante la rodadura, lo que puede alterar la adquisición de datos. En segundo lugar, es importante tener en cuenta que cuando la distancia entre los flancos del neumático y los sensores aumenta, la intensidad de la señal disminuye, lo que es especialmente importante en situaciones de paso por curva. Por tanto, la interpretación y el cálculo de las fuerzas laterales conlleva mayor complejidad que el de las fuerzas longitudinales [5].

➤ Darmstadt Tire

El Darmstadt Tire es un innovador sensor que debe su nombre a los investigadores de la *Darmstadt University of Technology*, quienes lo desarrollaron. El concepto se basa en un imán instalado en los tacos de la escultura del neumático, de forma que los movimientos del taco son monitorizados mediante un sensor de efecto Hall.

Los movimientos (es decir, la deformación) son dependientes de la fricción y de las fuerzas existentes en el contacto neumático calzada, principalmente las longitudinales, por lo que pueden ser calculadas a partir de la señal del sensor. Estos sensores demostraron ser válidos para medir la deformación de la banda de rodadura en condiciones de maniobrabilidad de vehículos en condiciones de laboratorio. Además, la señal captada por el sensor depende de la velocidad de rodadura y, en caso de que la calzada esté mojada, de la profundidad del agua. Este hecho permite que este tipo de sensores sean adecuados para avisar al conductor de la posibilidad de que se produzca *aquaplaning* [5,41].

Sin embargo, su producción en masa no se produjo debido a que las dimensiones y el consumo de energía del sensor de efecto Hall eran demasiado elevados.

➤ Surface Acoustic Wave sensors (SAW)

Los sensores SAW están basados en la tecnología de la radiofrecuencia y son ideales para la medición remota. Constan de un lector con una antena de emisión y recepción, un transpondedor SAW y una antena transponedora. La señal emitida es transformada por el sensor SAW en una onda acústica que la devuelve a la unidad de lectura como una señal de radio de alta frecuencia. De este modo, el valor del parámetro físico estudiado puede medirse mediante la relación entre los cambios en la longitud de la superficie del sensor o la velocidad de la onda acústica superficial [42]. Por lo tanto, los sensores SAW no sólo son válidos para medir parámetros como la deformación de la banda de rodadura, sino también otros como la presión o la temperatura [8,43,44].

Diseñar este tipo de sensores implica utilizar materiales sensibles a la señal deseada mediante la selección de materiales cristalinos apropiados para las condiciones de trabajo (presión, temperatura y material del sustrato), de forma que puedan reflejar la onda adecuadamente. En muchas aplicaciones los sensores SAW son componentes pasivos, recibiendo la energía de la señal emitida por el sistema de lectura [9].

Una de las ventajas de los sensores SAW es que pueden embeberse directamente en las capas del neumático, lo que posibilitaría la monitorización de la fricción [10].

➤ Capacitivos

Los sensores capacitivos han sido empujados en múltiples ocasiones para medir la deformación de la banda de rodadura [23]. En la investigación realizada por Sergio *et al.* [26], los sensores capacitivos actúan como sistemas pasivos, utilizando el primer y segundo cinturón de alambres y su deformación a su paso por la huella de contacto como una red de

impedancias. Cuando los alambres se estiran, la distancia entre los electrodos aumenta, aumentando a su vez la capacitancia del oscilador.

Recientemente, Cao *et al.* [45] utilizaron la interconexión de cables de cobre para obtener un capacitor en forma de la lámina, cuya capacitancia demostró ser proporcional a la deformación. Mediante este sensor fue posible medir la deformación de la banda de rodadura a partir de los cambios en la capacitancia.

➤ **Sensores capacitivos con base flexible**

Algunos autores, debido a que el neumático es un material muy elástico donde es difícil instalar sensores, han analizado la viabilidad de utilizar sensores flexibles. El concepto se basa en hacer la base del sensor de un material elástico con las mismas propiedades del neumático para minimizar los daños producidos al deformarse. Sin embargo, en la parte superior se diseña frecuentemente un sensor similar a los capacitivos por medio de fotolitografía. Matsuzaki *et al.* [22,32,46,47] han propuesto numerosas soluciones en sus investigaciones aprovechando las propiedades electromagnéticas, resistivas y capacitivas de los alambres embebidos en el neumático. Todas ellas son soluciones que no requieren el uso de sensores específicos, sin embargo, son técnicas muy intrusivas, puesto que tienen que sustraer partes del neumático para acceder a los alambres del mismo. Otra de las desventajas que arrojó la investigación es la influencia crucial de los cambios de temperatura en la capacitancia de la base elástica, teniendo que considerar la necesidad de realizar compensaciones por temperatura [41].

➤ **Sensores piezoeléctricos**

Los sensores piezoeléctricos utilizan el efecto piezoeléctrico para medir presión, fuerza, deformación, etc., transformando las medidas en señales eléctricas. Éstos resultan ideales para ensayos dinámicos, dado que reaccionan ante impulsos. Existen principalmente dos tipos de sensores piezoeléctricos: los piezo-cerámicos, que no pueden ser integrados en el neumático para la medida de la deformación debido a su fragilidad, y los piezo-polímeros (PVDF), que sí han demostrado ser adecuados para la medida de la deformación en el neumático [48].

En el trabajo desarrollado por Yi *et al.* [29], la medida de las deformaciones sobre la parte interna de la banda de rodadura se utilizó para analizar las características de la fricción entre el neumático y la calzada, mostrando buenos resultados para la medida de deformaciones en sentido longitudinal.

Recientemente, Erdogan *et al.* [30,49] utilizaron sensores piezoeléctricos para obtener la deflexión de los flancos del neumático, instalando éstos sobre la parte externa del propio neumático (ver Figura 2.10). Las mediciones proporcionadas por el sensor piezoeléctrico se corroboraron midiendo el mismo parámetro con una cámara, obteniendo posteriormente buenas estimaciones del ángulo de deriva tanto con los sensores piezoeléctricos como con la cámara hasta un ángulo de 5°.



Figura 2.10. Colocación del sensor piezoeléctrico en la parte exterior de un flanco del neumático [30].

Sohn *et al.* [50], por su parte, evaluaron el comportamiento de la señal de un sensor PVDF y la durabilidad de éste. Los resultados confirmaron la viabilidad de estos sensores para medir la deformación del neumático. Sin embargo, los sensores piezoeléctricos tienen la desventaja de que su respuesta (el efecto piezoeléctrico) empeora con el aumento de la presión y la disminución de la temperatura.

➤ Bandas extensométricas

Las bandas extensométricas son los sensores más utilizados para medir deformaciones. Aunque el Proyecto Apollo [5] ha sido el más importante hasta la fecha, han sido utilizados en otros muchos trabajos de investigación [27,35,51]. En todos ellos las bandas extensométricas se colocaron sobre la superficie interior de la banda de rodadura (ver Figura 2.11) y demostraron ser adecuadas para medir la deformación cuando la banda de rodadura está sometida a esfuerzos dinámicos. En la Figura 2.11 se muestra la disposición de las bandas extensométricas utilizadas en [35].

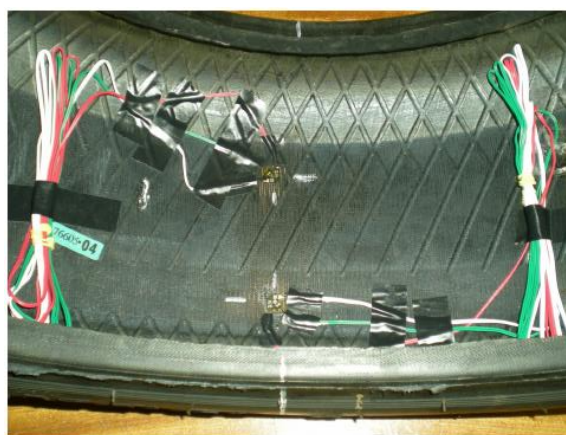


Figura 2.11. Colocación de las bandas extensométricas en la banda de rodadura [35].

La resolución y la robustez de los mismos resultó ser buena para la toma de medidas. Entre las principales desventajas están la rigidez de los adhesivos comúnmente utilizados, que las bandas extensométricas con baja elongación son excesivamente frágiles, y que es necesario pegarlas en la banda de rodadura, suponiendo una dificultad añadida en caso de tener que reemplazar el neumático.

2.2.2.2 Técnicas no intrusivas

➤ Sensores ópticos

Los sensores ópticos han sido ampliamente utilizados para lograr avances en el neumático inteligente. Funcionan sin estar en contacto con la superficie de la que se quieren extraer algunas de sus propiedades y se basan en el principio de triangulación, es decir, el sensor envía y recibe la señal reflejada por la superficie donde se desea medir. Además de los resultados satisfactorios obtenidos con este tipo de sensores en el Proyecto Apollo [5], otras investigaciones recientes los han utilizado para medir la deformación de la banda de rodadura. Utilizando la misma metodología, Xiong y Tuononen [52] estudiaron la deformación producida en la huella de contacto bajo distintas condiciones colocando el sensor entre la llanta y la banda de rodadura interna del neumático, como se muestra en la Figura 2.12.

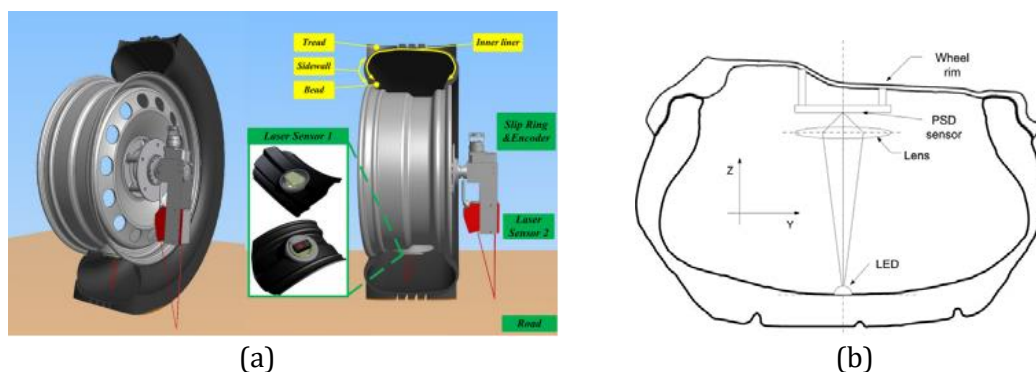


Figura 2.12. (a) Disposición del sensor óptico para medir la deformación de la banda de rodadura; (b) esquema de instalación del sensor óptico en la llanta [52].

Los autores de esta investigación demostraron que la deformación en la zona de la huella de contacto no es simétrica en sentido longitudinal en condiciones de línea recta, y que tanto la fuerza vertical como la velocidad y la presión afectan a la deformación, aunque en el caso de la velocidad sólo afecta de forma significativa en la entrada de la huella de contacto.

También destacan otros ensayos realizados bajo distintas condiciones siguiendo la misma metodología [28,53]. Por último, Xiong y Tuononen [54] presentaron resultados de la deformación de la banda de rodadura colocando también el sensor óptico en la llanta y sometiéndolo a distintas fuerzas verticales. Los resultados mostraron la eficacia de este tipo de sensor para determinar la fuerza vertical.

Aunque los resultados fueron satisfactorios, una de las desventajas más importantes para la utilización de este tipo de sensores es que el consumo de energía es elevado en comparación con otros como acelerómetros o bandas extensométricas. Además, se debe realizar la calibración del sensor cada vez que la carcasa o la presión del neumático cambien. Este hecho, y la problemática de la captación de la intensidad de la luz al ser el neumático una superficie negra, son los principales motivos por los que los sensores ópticos no han sido comercializados en masa [28].

➤ Sensores ultrasónicos

Los sensores por ultrasonidos dieron resultados especialmente buenos en la investigación llevada a cabo por Mágori *et al.* [36]. En ella, el sensor ultrasónico se instaló

sobre la llanta, midiendo la distancia entre la banda de rodadura y el sensor. El funcionamiento de los sensores de ultrasonidos como medidores de distancia es similar al de los sensores ópticos: un receptor emite un pulso de ultrasonido que rebota sobre la banda de rodadura y la reflexión es detectada por un receptor de ultrasonidos. En el caso de Magori *et al.* [36], el sensor fue provisto de un espejo para hacer rebotar la señal, aprovechando que, en el caso de los ultrasonidos, el ángulo de incidencia y reflexión es siempre el mismo.

Con la medida de la deformación se consiguió determinar la fuerza vertical y la deformación vertical de la banda de rodadura. En el estudio, se hicieron ensayos a diferentes presiones y fuerzas verticales, obteniendo buena correlación con los datos de deformación.

Una de las principales ventajas de estos sensores es que la medida se realiza, al igual que con los sensores ópticos, sin contacto directo con el neumático, por lo que, en caso de pinchazo o deterioro del neumático, éste puede ser reemplazado sin modificar el sensor.

➤ **Conclusión sobre los sensores utilizados para medir deformación**

Del estudio de la literatura existente se concluye que la mayoría de métodos y sensores están diseñados para la medida de la deformación del neumático, ya sea directamente o a partir de la medida de la aceleración o la distancia desde la llanta al neumático, ya que los datos de deformación pueden aportar mucha más información sobre las condiciones de trabajo del neumático y son en general sensores baratos, sobre todo las bandas extensométricas. Es por ello que los sensores de deformación son actualmente el mejor candidato a ser el segundo producto introducido en el mercado tras el TPMS en lo que al desarrollo del neumático inteligente se refiere.

Sin embargo, aunque la monitorización de la deformación del neumático arroje información crucial para determinar las condiciones de trabajo del neumático, resulta fundamental la alimentación de los sensores y la transmisión de información para utilizar posteriormente herramientas computacionales que posibiliten el aprovechamiento de la misma. Por ello, en el siguiente apartado se exploran brevemente los trabajos más destacados para la alimentación de los sensores, la transmisión de la información, y el uso de softwares y algoritmos para el desarrollo del neumático inteligente.

2.2.3 Alimentación de sensores y transmisión de información

Como se ha mencionado anteriormente, tan importante es la selección de los sensores y los parámetros a medir como satisfacer las necesidades energéticas de los mismos y la transmisión de los datos a los sistemas de control activo del vehículo y los conductores. Satisfacer los requerimientos energéticos e inalámbricos del sistema de sensores es uno de los mayores obstáculos para la consecución del neumático inteligente.

2.2.3.1 Generación de energía

Para resolver el abastecimiento de energía, durante los últimos años se han propuesto novedosos sistemas para conseguir una alimentación continua, sin la necesidad de recurrir a baterías que necesiten ser sustituidas al agotarse, ya que, en ese caso, debido al espacio reducido existente en el entorno de los neumáticos, supondría una dificultad añadida. A pesar de que las baterías tienen la ventaja de ser elementos que se pueden fijar fácilmente y que proporcionan un suministro de voltaje estable, tienen además la

desventaja de ser dependientes de la temperatura. Está comúnmente aceptado que el sistema de alimentación de los sensores del neumático inteligente debe cumplir los siguientes requisitos:

- debe ser una estructura simple que pueda ser integrada en el neumático;
- no debe tener partes móviles que puedan dañarse por las aceleraciones;
- se debe poder extraer la energía del propio neumático y;
- debe ser adecuado para el rango de frecuencias disponible.

Entre los trabajos llevados a cabo para aportar soluciones a este problema destacan los que aprovechan la energía procedente de la propia rueda, comúnmente a partir de la vibración. Los altos niveles de vibración en el interior del neumático tienen el potencial de generar energía mediante diferentes técnicas de captación. Estas técnicas, a su vez, tienen la desventaja de ser altamente exigentes debido a los espectros de vibración del neumático, ya que la variabilidad del mismo puede limitar de forma importante el almacenamiento de energía. Por ello, es necesario que los dispositivos de almacenamiento de energía sean a su vez adaptables a los anchos de banda del espectro de vibración para maximizar el almacenamiento de energía.

En la Tabla 2.1 se listan las principales fuentes de alimentación provenientes del neumático, así como el mecanismo de conversión, los puntos críticos y los requisitos.

Tabla 2.1. Características de las fuentes de energía del neumático [5,55].

Energía mecánica	Mecanismo de conversión	Puntos críticos y requisitos
Rotación	<ul style="list-style-type: none"> • Piezoelectricidad • Conversor electromagnético 	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste de la frecuencia
Vibración	<ul style="list-style-type: none"> • Convertidor electroestático 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil satisfacer los requisitos del sistema debido a la aleatoriedad de la frecuencia durante la conducción
Aceleración	<ul style="list-style-type: none"> • Piezoelectricidad • Convertidor electromagnético • Convertidor electroestático 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicable para mecanismos electromecánicos utilizando estructuras tipo muelle con suficiente energía
Deflexión	<ul style="list-style-type: none"> • Piezoelectricidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil protección • Materiales flexibles

Aunque existen principalmente cuatro fuentes de energía mecánica para generar energía eléctrica, los trabajos realizados hasta el momento revelan que la aceleración y la deformación del neumático son las fuentes de energía más interesantes. A pesar de que la señal proveniente de la aceleración tiene una alta dependencia de la velocidad, la amplitud de la señal la hacen adecuada para obtener energía eléctrica a partir de ella. En cuanto a la deformación, ésta es menos dependiente de la velocidad que la aceleración y la energía eléctrica generada es directamente proporcional a la deformación existente [55]. Por otro lado, la utilización de la vibración tiene más inconvenientes de lo que en un principio pudiera parecer. La dependencia de la vibración con la velocidad y el tipo de superficie hacen que la señal tenga un espectro de frecuencias demasiado cambiante para no ser tratado de forma previa a la conversión energética, algo que no ocurre en el caso de la deformación y la aceleración [5].

En lo que a generadores se refiere, las dos principales posibilidades para convertir energía mecánica en eléctrica teniendo en cuenta los requisitos anteriormente mencionados y las características del neumático son los generadores capacitivos y piezoeléctricos. Los sensores piezoeléctricos (en especial los basados en polímeros) parecen ser los más adecuados para desarrollar el neumático inteligente. En la Tabla 2.2 se

resumen las principales ventajas y desventajas de los generadores capacitivos y piezoeléctricos, tanto los poliméricos como los cerámicos.

Tabla 2.2. Propiedades de los generadores de energía en el entorno del neumático [5].

Tipo de generador	Ventajas	Desventajas
Capacitivo (elastómero)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Buenas propiedades térmicas. ↑ Se puede integrar en el neumático. 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ Necesita una fuente externa para la carga inicial. ↓ Cuando las deformaciones del neumático son pequeñas, los cambios en la capacitancia también lo son.
Piezopolimérico (PVDF)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Se puede integrar en el neumático. ↑ Las deformaciones en un neumático son compatibles con las deformaciones de trabajo del generador. 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ Limitaciones térmicas ↓ Menor coeficiente de carga y durabilidad que los cerámicos.
Piezocerámico (PZT)	<ul style="list-style-type: none"> ↑ Buenas propiedades térmicas. ↑ Buena eficiencia de conversión de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ Frágil. ↓ Más difícil de integrar en un neumático que los poliméricos.

Uno de los trabajos más interesantes realizados hasta el momento fue publicado en 2012 por Singh *et al.* [56]. Mediante generadores piezocerámicos con materiales de alta densidad energética adaptados a un determinado rango de frecuencias demostraron que las vibraciones inerciales pueden ser aprovechadas para generar energía eléctrica.

Recientemente, Lee y Choi [55] desarrollaron un sistema de generación de energía mediante generadores piezoeléctricos instalados en la parte interior del neumático.

Otro trabajo interesante fue realizado en 2011 por Makki y Pop-Iliev [57]. El trabajo consistió en recubrir la parte interior de la banda de rodadura del neumático (sin cubrir los flancos) con generadores piezocerámicos (PZT), como se muestra en la Figura 2.13, obteniendo resultados satisfactorios.



Figura 2.13. Ristra de generadores PZT en el interior de la banda de rodadura [57].

Entre los trabajos realizados con generadores capacitivos destaca el de Meninger *et al.* [58], quienes utilizaron este tipo de generador junto a un capacitor variable de tipo MEMS. Aunque el sistema no fue probado en aplicaciones relacionadas con el neumático, demostraron la capacidad del método para generar energía eléctrica a partir de vibraciones.

Para finalizar, en el trabajo realizado por Kubba y Kyle [59] se aglutinan los trabajos realizados hasta el momento y las distintas alternativas para generar energía a partir del propio neumático. Algunos de esas investigaciones proponen técnicas o materiales alternativos [15,60,61], quedando demostrado que, aunque queda mucho trabajo por delante, la gran variedad de soluciones y fuentes de energía aumentan las posibilidades de alcanzar una solución definitiva.

2.2.3.2 Transmisión de información

La transmisión de información desde el neumático hacia el vehículo para su aprovechamiento es uno de los puntos clave a desarrollar para que el “neumático inteligente” sea una realidad. En los últimos años, se han desarrollado tecnologías de transmisión inalámbrica de datos como Bluetooth, Home RF ó IEEE 802.11 [5], que son válidas para transmitir mensajes cortos en tiempo real, es decir, con tiempos reducidos de respuesta y comunicación.

Los métodos de transmisión de información se pueden dividir a su vez en dos tipos: activos o pasivos. Los sistemas de transmisión de datos activos son aquellos que aprovechan la energía generada por los propios sensores (piezoeléctricos, capacitivos, etc.) para alimentar al mismo tiempo el sistema de transmisión, mientras que los pasivos son alimentados externamente.

➤ **Sistemas de transmisión activos**

Los sistemas de transmisión activos basan su alimentación en la utilización de la resonancia eléctrica de un capacitor y un inductor, convirtiendo los datos a la frecuencia de resonancia para su transmisión [23].

Entre los trabajos que además de estudiar la viabilidad de sensores para monitorizar parámetros del neumático incluyen el estudio de la transmisión de datos destaca el realizado por Yi *et al.* [29], quienes utilizaron un sensor piezoeléctrico de tipo PVDF para medir la deformación del neumático y alimentar un sistema de transmisión de datos inalámbrico basado en protocolos de comunicación inalámbrica. A este sistema de comunicación se recurre frecuentemente por la seguridad para enviar bajas tasas de datos y el bajo consumo de energía que requiere. Para alimentar el sistema se instaló una batería en el interior de la rueda que servía de puente entre la energía generada por el sensor piezoeléctrico y el sistema de comunicación. Otros estudios han utilizado otros métodos con resultados satisfactorios [62,63].

➤ **Sistemas de transmisión pasivos**

A diferencia de los sistemas activos, el esquema de funcionamiento de estos sistemas para investigaciones relacionadas con el desarrollo del neumático inteligente se divide en tres partes claramente diferenciadas: el interior del neumático, que contiene los sensores, la rueda, que alberga los equipos para la transmisión de información, y el receptor, que podría ir instalado en el vehículo.

El sistema de transmisión de datos, por tanto, es un sistema independiente que debe ser alimentado de forma alternativa, y no gracias a la energía generada por los sensores. En los últimos años, se están estudiando alternativas para alimentar los sistemas de comunicación pasiva de forma inalámbrica, como la utilización de dos inductores con acoplamiento electromagnético a través de la identificación de una determinada frecuencia [64,65].

Entre los trabajos en el campo del neumático inteligente utilizando el acoplamiento electromagnético entre dos inductores destaca el realizado por Matsuzaki *et al.* [66], utilizando una antena y el sensor como inductores. Nabipoor *et al.* [67] emplearon la misma técnica, pero midiendo la presión y la temperatura del neumático, sin embargo, la energía debida al acoplamiento electromagnético fue insuficiente para activar la transmisión de datos, lo que provocó además grandes limitaciones en cuanto a la distancia máxima de transmisión.

Matsuzaki *et al.* [66,68] también realizaron distintos estudios para la transmisión pasiva de datos sin recurrir al acoplamiento electromagnético. Propusieron un sistema sin baterías que constaba de un transmisor externo, un sensor de deformación y un receptor externo.

➤ Conclusión

Los trabajos realizados hasta el momento y los avances en el campo de las telecomunicaciones hacen que la transmisión inalámbrica de datos tenga un futuro prometedor, tanto en los sistemas activos como pasivos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el hecho de que los sistemas pasivos permitan utilizar sensores que no tienen la capacidad de generar energía por sí mismos (como las bandas extensométricas o los sensores ópticos) hace que estos sistemas sean más versátiles para el desarrollo del neumático inteligente.

2.2.4 Avances en las herramientas computacionales

El primer objetivo de todas las investigaciones es medir un parámetro físico (aceleración, deformación, etc.) para poder relacionarlo con alguna de las condiciones de trabajo del neumático (velocidad, presión, fuerza vertical, etc.), sin embargo, la tecnología y los progresos en la computación posibilitan el desarrollo y prueba de algoritmos de forma rápida y económica para conocer de qué forma la monitorización de esos parámetros podrían beneficiar a vehículos y conductores.

Reiter y Wagner [69], por ejemplo, sugirieron la posibilidad de mejorar el comportamiento dinámico del vehículo modificando la presión de los neumáticos en cada situación, concluyendo que cuando la presión de inflado de los neumáticos delanteros disminuye, se obtienen mayores ángulos de giro (es decir, subviraje), mientras que la reducción de la presión en los neumáticos traseros aumenta el ángulo de deriva de los neumáticos delanteros. Aunque es de vital importancia conocer la influencia de los distintos parámetros físicos del neumático en su comportamiento y en el del vehículo, en ese trabajo queda evidenciado que la toma de decisiones en tiempo real a partir de la monitorización de parámetros como la presión, temperatura, aceleración o deformación del neumático resulta clave para la prevención de accidentes y la mejora del comportamiento dinámico del vehículo y sus componentes. En este sentido también se han desarrollado algoritmos para estimar la fricción y el ángulo de deriva de los neumáticos a partir la señal proporcionada por acelerómetros instalados en neumáticos [70]. Finalmente, al igual que en el trabajo realizado por Jens *et al.* [19], otro estudio adoptó el modelo de cerdas de Fromm y Julien [20] para determinar la deformación en el interior del neumático y relacionarla con la adherencia potencial del neumático mediante un algoritmo [71].

Cabe destacar la utilización de métodos estimadores como las Redes Neuronales Artificiales (RNA), con las que se consigue estimar parámetros de funcionamiento del neumático a partir de la medición de datos experimentales. En este campo, Kim *et al.* [51] estimaron la longitud de la huella de contacto a partir de la deformación de la banda de rodadura. En su investigación, Tuononen [72] estimó la guiñada y la velocidad lateral del vehículo mediante un filtro estimador de Kalman a partir de los datos obtenidos mediante un sensor óptico instalado en la llanta.

Con respecto a los avances computacionales, el MEF es una de las técnicas más recurridas para modelizar el comportamiento de los neumáticos y poder así ahorrar el tiempo y costo de los estudios puramente experimentales, con los que a su vez se

comprueban los modelos computacionales. Diversos estudios han conseguido modelizar con éxito el neumático, pudiendo simular el comportamiento del mismo ante distintos esfuerzos. La verificación de los modelos se lleva a cabo mediante la comparación de los resultados de simulación con resultados obtenidos mediante ensayos experimentales [34]. La evolución de los softwares y técnicas de simulación han hecho del MEF una técnica cada vez más recurrida.

➤ Conclusión

De la literatura estudiada se concluye que para desarrollar un prototipo de neumático inteligente es fundamental responder previamente a algunas cuestiones que están directamente relacionadas con las problemáticas que todas las investigaciones han tratado de resolver. Dichas cuestiones se esquematizan en la Figura 2.14.

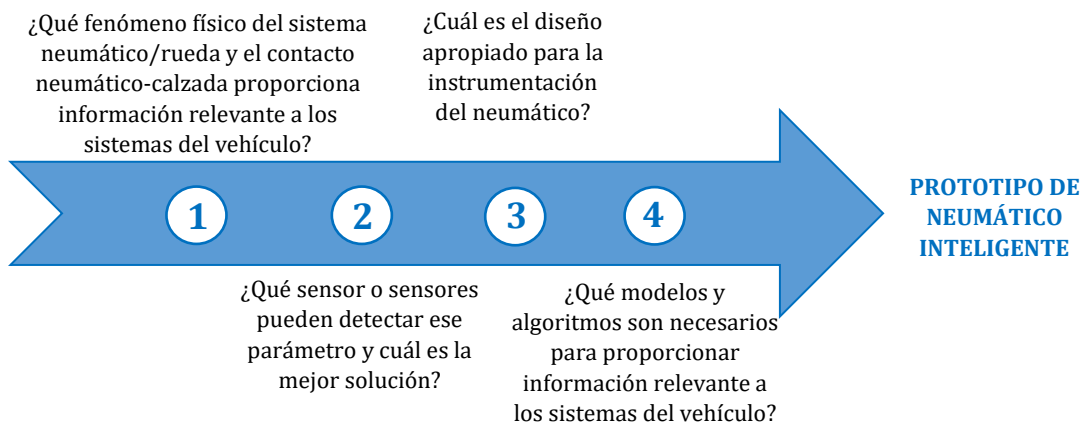


Figura 2.14. Pasos básicos para plantear una investigación para el desarrollo del neumático inteligente.

Capítulo 3

Objetivos

El principal objetivo que se pretende alcanzar en esta Tesis Doctoral es diseñar un sistema de detección del deslizamiento lateral para neumáticos instrumentados mediante extensometría. Para ello, se utilizarán los datos de deformación obtenidos experimentalmente como entradas de un sistema de estimación que se desarrollará mediante lógica difusa.

Para la adquisición de datos, se llevarán a cabo una serie de experimentos bajo condiciones controladas de laboratorio, analizando los datos de deformación obtenidos y la relación existente entre éstos y las condiciones de trabajo del neumático.

A partir de este estudio se plantea el segundo objetivo de la presente Tesis Doctoral, que consiste en demostrar el potencial y la idoneidad de las bandas extensométricas para, analizando el comportamiento dinámico de la banda de rodadura, proporcionar información sobre las condiciones de trabajo del neumático con el fin de desarrollar el neumático inteligente en un futuro próximo.

Capítulo 4

Fases de la Tesis Doctoral

Para la consecución de los objetivos planteados se desarrollarán las fases indicadas en la Figura 4.1.

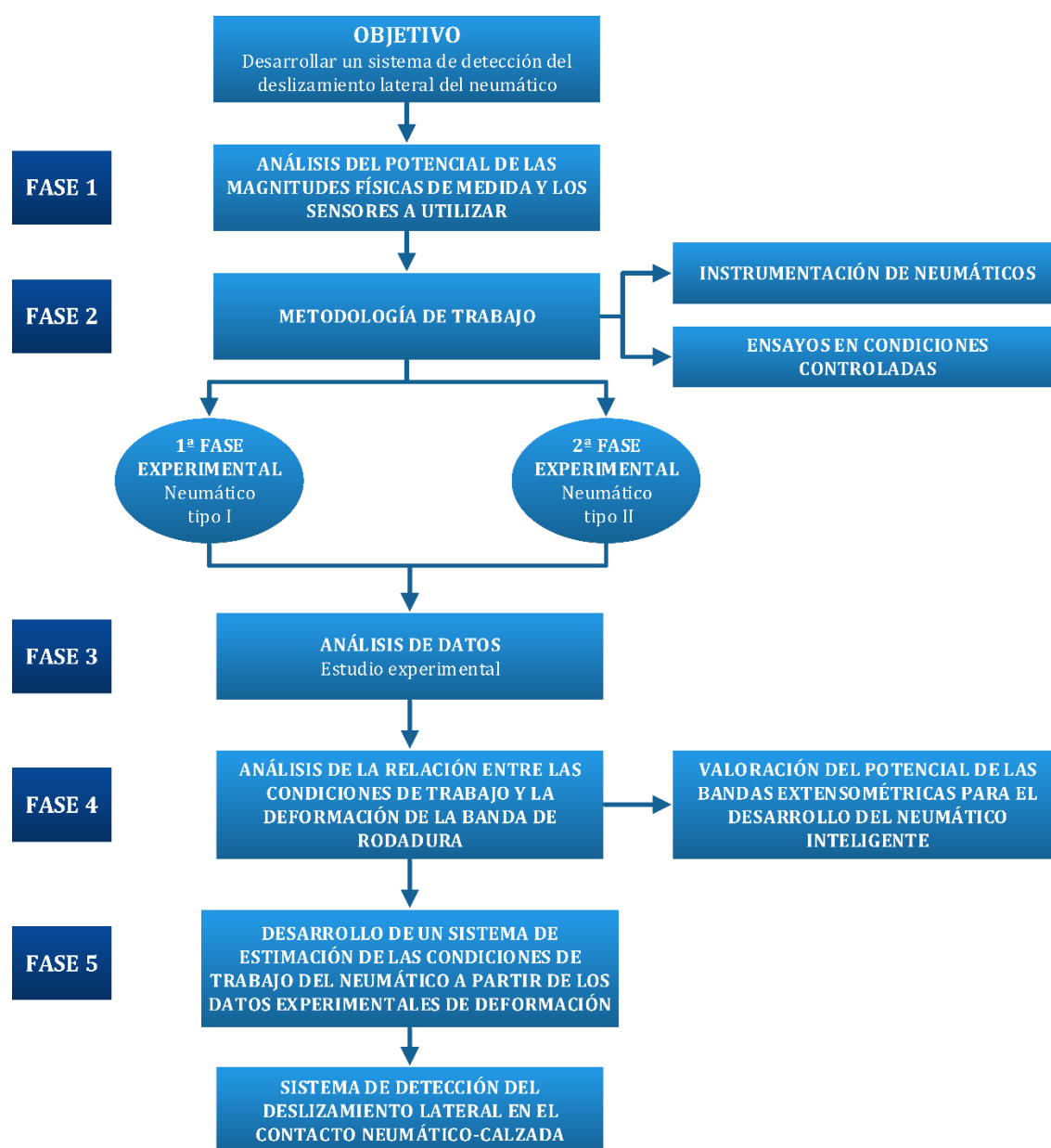


Figura 4.1. Etapas de desarrollo de la Tesis Doctoral.

En primer lugar, en la Fase 1 se analiza el potencial de las distintas magnitudes físicas en el Estado del Arte y se determina aquella que puede ofrecer mayor potencial, estudiando qué tipo de sensor es el más adecuado para su medición.

En la Fase 2 se establece una metodología de ensayo adecuada para alcanzar los objetivos de la presente Tesis Doctoral, principalmente en lo que a condiciones de ensayo se refiere. Del mismo modo, se seleccionan los equipos necesarios para la instrumentación de los neumáticos que se utilizan en la primera y segunda fase experimental.

En la Fase 3 se lleva a cabo un estudio experimental mediante el análisis de datos, calculando los ciclos medios representativos y comparando las diferencias en los puntos significativos de las curvas de deformación.

En la Fase 4 se analizan las posibles relaciones entre la señal de deformación obtenida y la variación de las condiciones de trabajo de los neumáticos para utilizarlas como datos de entrada en un sistema de estimación que pueda ser usado en condiciones de funcionamiento.

Por último, en la Fase 5 se lleva a cabo dos etapas; la primera de ellas, para el desarrollo de un sistema de estimación que utilice como datos de entrada la deformación de la banda de rodadura del neumático; y la segunda, en la que se implementa este sistema junto con un modelo experimental para realizar un cálculo estimado del coeficiente de adherencia lateral solicitado en el contacto neumático-calzada, detectando la pérdida de adherencia.

Capítulo 5

Materiales y métodos

5.1 Equipamiento

5.1.1 Banco de ensayo de neumáticos

El sistema de ensayos utilizado para la realización de los experimentos es un banco de ensayos de neumáticos de la Universidad de Birmingham, el cual permite reproducir el comportamiento dinámico de un neumático bajo condiciones controladas.

En la Figura 5.1 (a) se muestra el banco de ensayo de neumáticos triaxial utilizado con un neumático instalado. Éste se compone de una estructura rígidamente fijada al suelo para la sujeción del tambor y los actuadores, que permiten modificar la posición del neumático con respecto al tambor de giro, variando por tanto las fuerzas aplicadas al mismo (ver Figura 5.1 (b)).

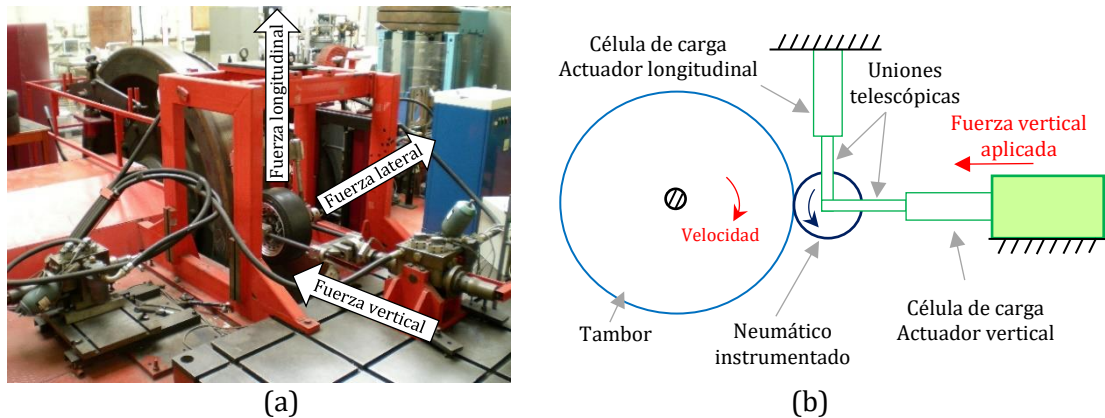


Figura 5.1. (a) Banco de ensayos utilizado para la realización de ensayos; (b) esquema de los componentes principales del banco.

El principal elemento del banco de ensayos es el tambor de rodadura, de 2,44 m de diámetro, que permite simular la calzada para obtener las reacciones que provoca el neumático sobre ella. Aunque se podría pensar que la superficie curva supone una desventaja al no ser condiciones totalmente realistas, el gran diámetro del tambor permite obtener resultados muy similares a los que se obtendrían en una calzada con superficie plana. El tambor puede girar a velocidad controlada gracias a una unidad para el control de la misma, que dispone de un potenciómetro. Sin embargo, la velocidad también se puede controlar a través de un ordenador con el software específico del banco de ensayos para mayor precisión y comodidad.

Los actuadores dispuestos en los ejes longitudinal y lateral permiten controlar la fuerza longitudinal y lateral del neumático, mientras que el actuador dispuesto

verticalmente permite aplicar una fuerza vertical controlada. Los actuadores verticales y longitudinales se mueven gracias a una bomba hidráulica adyacente al banco de ensayos.

Para cada actuador, el banco de ensayo dispone de una célula de carga, con las que se pueden registrar las fuerzas a las que está sometido el neumático, y de un sensor de desplazamiento, para controlar la posición del neumático y, por tanto, las fuerzas aplicadas sobre el mismo. La localización de estos elementos se muestra en la Figura 5.2.

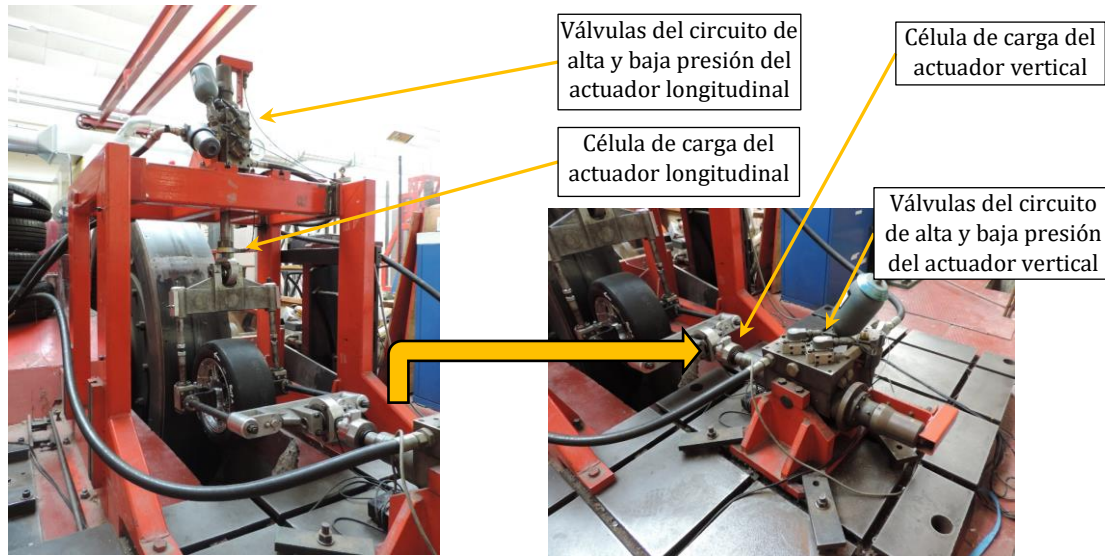


Figura 5.2. Localización de las válvulas y células de carga del banco de ensayos.

A pesar de que el banco de ensayo permite registrar fuerzas en los tres ejes principales, no se pueden realizar simultáneamente para las fuerzas en sentido lateral y longitudinal, sino que cuando se realizan ensayos en línea recta se pueden registrar fuerzas en sentido longitudinal y vertical, mientras que cuando se llevan a cabo ensayos en curva, se pueden registrar fuerzas en sentido lateral y vertical.

La posibilidad de realizar ensayos en condiciones de paso por curva es otra de las características del banco de ensayos ya que, junto a la variación de velocidad y fuerza vertical, multiplica las posibilidades de ensayo. La variación del ángulo de deriva del neumático es posible gracias a la instalación de un dispositivo que se coloca en la parte superior del banco para modificar este parámetro de forma controlada (ver Figura 5.3).

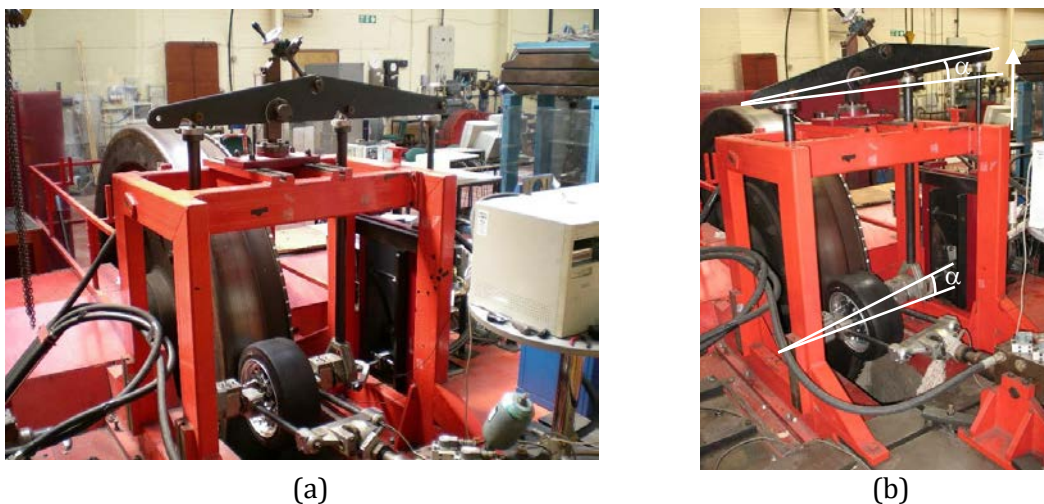


Figura 5.3. (a) Banco de ensayos preparado para la realización de ensayos en curva; (b) ángulo de deriva aplicado al neumático mediante el dispositivo.

En la segunda fase experimental se modificó la posición del actuador vertical para configurar la posición del neumático con un cierto ángulo de caída.

Por último, cabe apuntar que, tal y como sucedió en el experimento llevado a cabo por Bolarinwa [73], el banco de ensayos, y en concreto la célula de carga que mide la fuerza longitudinal, mostró resultados inconsistentes en las medidas, debido posiblemente a la resolución inadecuada de la célula de carga dispuesta para medir esta fuerza. Por este motivo, tan sólo se analizará la fuerza lateral en los ensayos realizados en esta Tesis Doctoral.

5.1.2 Sensores

En la presente Tesis Doctoral, la técnica experimental de medida utilizada ha sido la extensometría mediante bandas extensométricas. La extensometría es una técnica experimental para la medida de esfuerzos y deformaciones que tienen lugar en la superficie del material objeto de estudio.

Las bandas extensométricas permiten obtener una lectura directa de la deformación producida en un punto de la superficie del material a estudiar en el que se ha colocado el sensor. Estos sensores están constituidos básicamente por una base muy delgada no conductora, denominada soporte, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino de forma que la mayor parte de su longitud está distribuida principalmente en dirección longitudinal.

Aunque existen varios tipos de bandas extensométricas según la constitución del material conductor con el que están fabricadas y del tipo de distribución de los hilos, en la Figura 5.4 se muestra esquemáticamente una banda extensométrica de hilo metálico como las que han sido utilizadas en esta Tesis Doctoral. Este tipo de banda suele utilizarse en aplicaciones que requieren medidas a temperaturas elevadas o con grandes deformaciones en el material.

El principio de medida se basa en el cambio de la conductividad eléctrica (efecto piezorresistivo) del material al aplicarse una fuerza a través del mismo, ya que esta tensión mecánica, debida a la acción de una presión, produce una variación en la longitud y diámetro del hilo de resistencia. Por lo tanto, la resistencia de la banda viene dada por la resistencia eléctrica del hilo, que es directamente proporcional a su longitud, es decir, las deformaciones que se producen en la superficie del material al cual está adherida la banda provoca una variación en la longitud de los hilos y, por consiguiente, una variación de la resistencia eléctrica.

De este principio de funcionamiento se deduce que cuando el material está sometido a tensión se produce un aumento de la resistencia eléctrica de la banda extensométrica, mientras que en un estado de compresión la resistencia disminuye, como se muestra en la Figura 5.4.

Por lo tanto, existe una relación biunívoca entre la variación de la resistencia eléctrica de la rejilla (conjunto de hilos de medida) y la deformación de la misma, que se supone equivalente a la deformación del material donde está adherida la banda.

La unidad de medida de la deformación se expresa mediante el símbolo “ ε ” (épsilon). Esta unidad de medida es adimensional, y expresa la relación entre el incremento de longitud experimentado en el punto de medida con respecto a la longitud inicial. Es por ello

que comúnmente se habla de “deformaciones” (ϵ) ó “microdeformaciones” ($\mu\epsilon$) en función de la escala de medida.

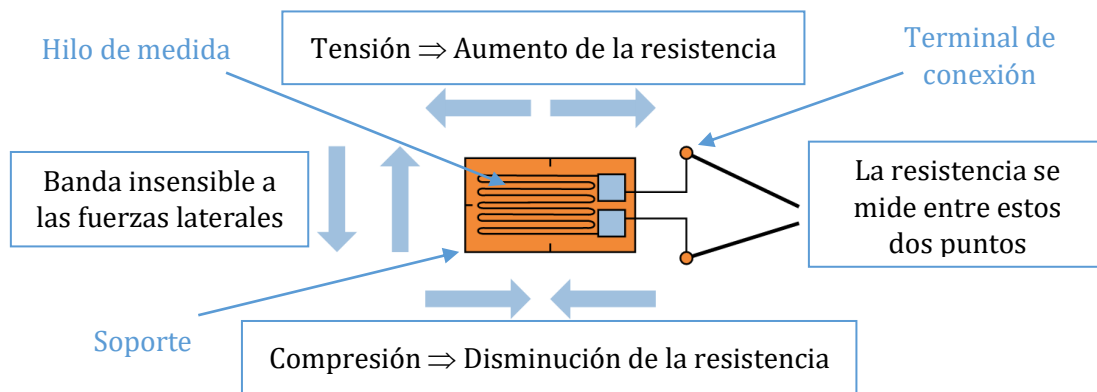


Figura 5.4. Esquema de funcionamiento de las bandas extensométricas y componentes principales.

En la Tabla 5.1 se resumen las principales ventajas y desventajas de las bandas extensométricas.

Tabla 5.1. Ventajas y desventajas de las bandas extensométricas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ↑ Tamaño reducido. ↑ Se pueden alimentar por CC o CA. ↑ Excelente respuesta en frecuencia. ↑ Adecuados para medidas estáticas y dinámicas. ↑ Fácil compensación de temperatura. ↑ No están influenciadas por campos magnéticos. ↑ Linealidad. ↑ Baja impedancia de salida. 	<ul style="list-style-type: none"> ↓ Señal de salida débil. ↓ Muy sensible a las vibraciones. ↓ Dependencia de la temperatura. ↓ Con el tiempo puede perder adhesión a la superficie.

Además de las citadas desventajas, estos sensores tienen algunas limitaciones añadidas. Entre ellas destacan que el esfuerzo aplicado no debe llevar a la banda fuera del margen elástico, por lo que hay que tener en cuenta la deformación máxima de la banda, y que éstas sólo miden en una dirección, por lo que hay que colocar bandas en cada dirección que se desee medir.

En esta Tesis Doctoral se han realizado dos fases experimentales con neumáticos, bandas extensométricas y equipos de adquisición de datos diferentes. En los ensayos realizados con el neumático tipo I (1ª fase experimental) se utilizaron bandas extensométricas triaxiales auto-compensadas en temperatura con las siguientes características:

- Fabricante: Kyowa;
- Tipo: KFEL-2-120-D35L1M2S (triaxiales);
- Longitud: 2 mm;
- Resistencia: 120 Ω ;
- Factor de banda: $2,11 \pm 1$ %;
- Condiciones ideales de los ensayos: 23 °C, 50% HR.

Estas bandas son válidas para ensayos de larga duración. Además, pueden adherirse a distintas superficies como acero, acero inoxidable, aluminio y materiales plásticos.

En el caso de los ensayos realizados con el neumático tipo II (2ª fase experimental), se instalaron bandas extensométricas uniaxiales diferentes para los flancos del neumático

y para la banda de rodadura, siendo la principal diferencia la longitud de las bandas. Aunque uno de los objetivos de la presente Tesis Doctoral es analizar el comportamiento de la banda de rodadura, debido a la complejidad del montaje del neumático en la llanta, se decidió instalar además bandas extensométricas en los flancos del neumático para estudios futuros. El análisis en profundidad de los resultados obtenidos por estos sensores se propondrá como línea de investigación futura.

Para los flancos del neumático se utilizaron las siguientes bandas extensométricas:

- Fabricante: Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.;
- Tipo: FLA-3-11-1L (uniaxiales);
- Longitud: 3 mm;
- Resistencia: $120\ \Omega$;
- Factor de banda: $2,12 \pm 1\ \%$;
- Condiciones ideales de los ensayos: $23\ ^\circ\text{C}$, 50% HR.

Para la banda de rodadura se utilizaron bandas extensométricas con las siguientes características:

- Fabricante: Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.;
- Tipo: FLA-6-11(uniaxiales);
- Longitud: 6 mm;
- Resistencia: $120\ \Omega$;
- Factor de banda: $2,12 \pm 1\ \%$;
- Condiciones ideales de los ensayos: $23\ ^\circ\text{C}$, 50% HR.

5.2 Instrumentación de neumáticos

5.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

El neumático utilizado en los primeros ensayos fue el neumático DUNLOP SP SPORT 175/505 R13 (neumático tipo I a partir de este punto). Este tipo de neumático trabaja a presiones y fuerzas verticales no muy elevadas. Se utiliza con frecuencia en competiciones como la Fórmula 3 o la *Formula Student* (FSAE). Al ser un neumático de competición, la característica principal es que la banda de rodadura es de tipo *slick*, es decir, sin escultura para la evacuación del agua (ver Figura 5.5).



Figura 5.5. Neumático tipo I.

Otra de las características del neumático es que es sin cámara (*tubeless*), lo que permite instrumentarlo interiormente sin que interfiera con otros elementos.

➤ Instalación de sensores

Como se ha mencionado en el estado del arte, la zona del neumático que se desea estudiar es la banda de rodadura sobre la superficie interior del neumático. Para el estudio de la deformación se adhirieron bandas extensométricas simétricamente a ambos lados del plano medio longitudinal de la línea media de la banda de rodadura, como se muestra en la Figura 5.6.

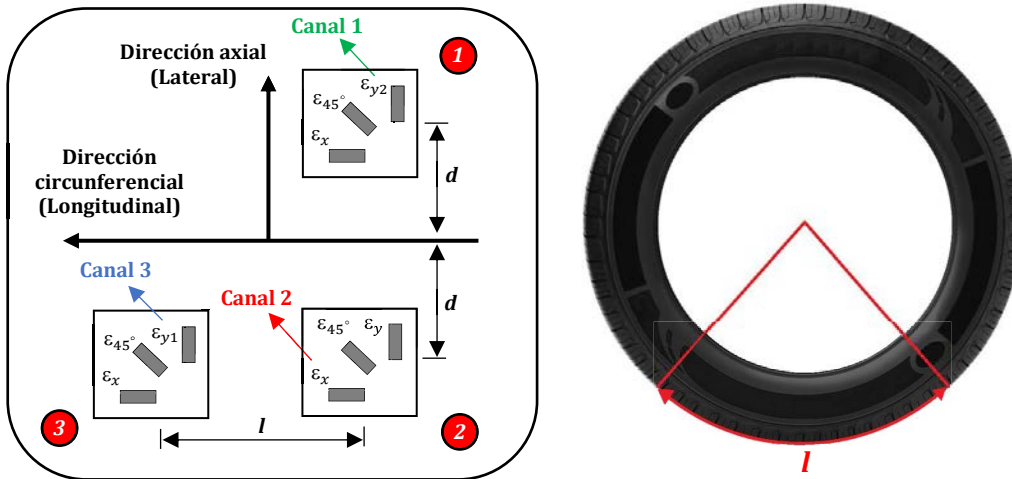


Figura 5.6. Disposición de las bandas extensométricas sobre la parte interior de la banda de rodadura del neumático tipo I.

La distancia d entre el centro de las rosetas 1 y 2 y la línea media de la banda de rodadura es de 0,040 m, mientras que la distancia l entre el centro de las rosetas 2 y 3 es de 0,515 m.

Para el pegado de las bandas se siguió el procedimiento recomendado por el fabricante del adhesivo. En primer lugar, se preparó la superficie de pegado de las bandas mediante un papel de lija para limpiarla posteriormente con alcohol para desgrasar la superficie y evitar el despegue de las bandas durante los ensayos. A continuación, se procedió al pegado de las bandas utilizando el adhesivo M-Bond GA-2 del fabricante Vishay® (Vishay, Malvern, PA, USA), el cual es adecuado para superficies flexibles e irregulares (ver Figura 5.7).



(a)



(b)

Figura 5.7. (a) Utilización del adhesivo de montaje; (b) pegado de las bandas sobre la banda de rodadura.

Es interesante comentar que, como se observa en la Figura 5.8, la banda de rodadura en la que se pegaron las bandas es muy fina, hasta el punto de que se atisban los alambres de la carcasa del neumático. Por lo tanto, se puede considerar que no existen efectos de rigidez local provocada por la rigidez de los sensores.

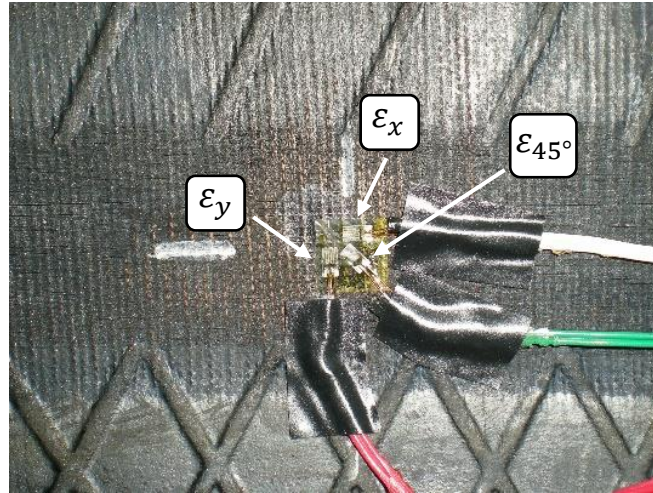


Figura 5.8. Disposición de las bandas extensométricas en la roseta 2.

Una vez se pegaron las bandas, se fijaron los cables a la banda de rodadura mediante cinta aislante (ver Figura 5.9). Gracias a que el neumático no necesita cámara, no existen elementos que interfieran o puedan dañar el cableado y los sensores.

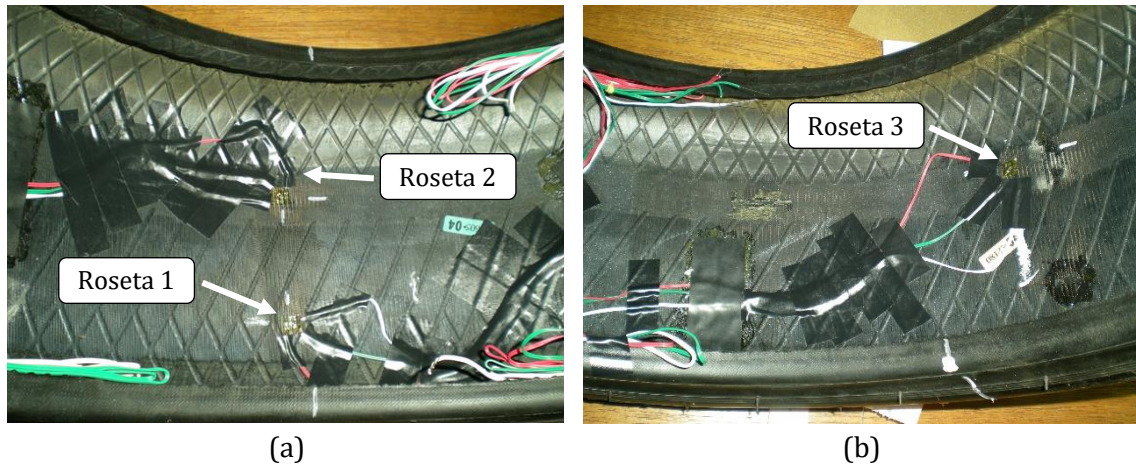


Figura 5.9. (a) Rosetas 1 y 2 pegadas en la banda de rodadura del neumático; (b) roseta 3.

La disposición de las bandas extensométricas se diseñó no sólo para medir la deformación en dirección lateral, longitudinal y a 45°, sino para obtener tanto la deformación en las direcciones principales como la deformación a cortadura. Sin embargo, aunque inicialmente se disponía de tres canales por cada roseta, debido a distintos problemas durante el proceso de instalación de las bandas, algunas de ellas no realizaban mediciones coherentes durante los primeros experimentos y otras tomaban medidas equivalentes, por lo que, teniendo en cuenta la memoria de almacenamiento del equipo de adquisición, se decidió conectar únicamente tres canales al equipo de adquisición de datos, cuyas mediciones son objeto de estudio en la presente Tesis Doctoral, quedando el estudio de las tensiones principales y esfuerzos cortantes para trabajos futuros.

Los problemas con el cableado de los sensores evidencian que la correcta instalación de las bandas, así como su durabilidad y robustez son temas cruciales para la viabilidad de este tipo de sensores en aplicaciones relacionadas con el neumático inteligente.

Con los tres canales seleccionados, indicados en la Figura 5.6, se obtiene información tanto en sentido lateral (canales 1 y 3) como longitudinal (canal 2).

➤ **Equipo de adquisición de datos**

El equipo de adquisición de datos utilizado para la realización de los ensayos con el neumático tipo I fue el Somat® 2000 Field Computer System (ver Figura 5.10).



Figura 5.10. Equipo de adquisición de datos Somat® 2000.

El Somat® 2000 es un equipo portátil, provisto de módulos apilados, que cuenta como hardware principal con un módulo de procesador y otro de alimentación/comunicación.

La tapa de aluminio está diseñada para protección frente al polvo y la humedad, mientras que el módulo de alimentación es un sistema basado en baterías. Pueden instalarse hasta tres baterías de 9 V, haciendo un total de 27 V (ver Figura 5.11).

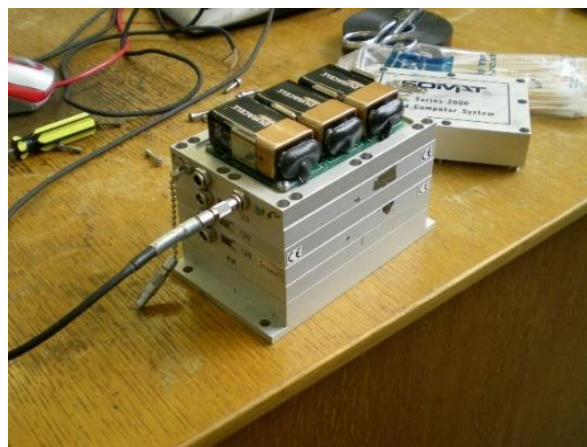


Figura 5.11. Somat® 2000 equipado con baterías.

Estas baterías fueron usadas para alimentar el equipo durante los ensayos. Este equipo, además, está diseñado para la adquisición de datos en diferentes ambientes y

condiciones de trabajo. Debido a que es un dispositivo diseñado mediante módulos apilados, es posible instalar más módulos y utilizarlo en múltiples aplicaciones.

En el Somat® 2000 cada canal funciona como un puente de Wheatstone capaz de operar en la configuración de un cuarto, medio o puente completo. En este caso fueron conectados los canales indicados en la Figura 5.6 con la configuración de un cuarto de puente. El equipo de adquisición se configuró para medir con tres canales de forma simultánea, conectando los módulos del equipo de adquisición a las bandas extensométricas.

Durante los ensayos el equipo se controla mediante el software TestPoint® software (Capital Equipment Corporation, Norton, MA, USA) disponible para Windows (WinTCS) cuya interfaz se muestra en la Figura 5.12.

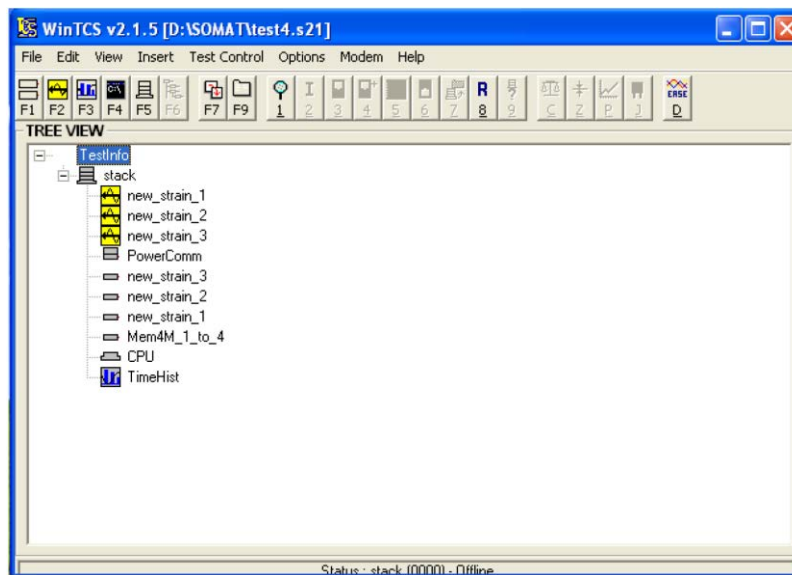


Figura 5.12. TestPoint® software para Windows (WinTCS).

Mediante el software WinTCS el usuario puede configurar el equipo para las condiciones de ensayo deseadas a través de un cable que comunica el ordenador al Somat® 2000. Una vez configurado, el cable puede ser desconectado para que no interfiera en con los distintos elementos cuando el neumático esté en movimiento.

El equipo puede generar datos en formato digital tras almacenarlos y transformar los bytes del código binario muestreando la señal eléctrica generada por las bandas extensométricas.

La memoria del Somat® 2000 es de 4MB, la cual utiliza para almacenar los datos hasta que el usuario los mueve a un ordenador. Esta memoria supone una clara limitación en la duración del proceso de adquisición de datos, o lo que es lo mismo, la duración de los ensayos. Además, esta limitación de memoria limita la frecuencia de muestreo que puede adoptarse para la toma de datos.

El rango de la frecuencia de muestreo disponible es de 0,0005 a 5000 Hz. Sin embargo, como se ha mencionado, una frecuencia de muestreo elevada provoca que la memoria del equipo se llene más rápido, por lo que fue necesario buscar una frecuencia de muestreo de equilibrio entre estos dos factores. Por ello, la frecuencia para los ensayos se fijó en 1000 Hz, que es adecuada para obtener curvas de deformación con la suficiente resolución como para no perder información de los picos más relevantes en cada revolución del neumático.

En cuanto al rango de deformación, el Somat® 2000 permite adquirir datos de deformación entre -5000 y 5000 $\mu\epsilon$. Este rango también resulta adecuado para los valores de deformación que se producen en la banda de rodadura del neumático tipo I para las condiciones de ensayo propuestas.

➤ Preparación de la llanta

Debido a que el neumático rota durante la mayor parte del tiempo de trabajo y que debe ir sellado a la llanta para evitar la fuga de aire con la consiguiente pérdida de presión, fue necesario realizar modificaciones en la llanta para evitar la interferencia entre el cableado de los sensores y la propia llanta.

La llanta tiene como característica principal que es modular, es decir, se puede dividir en varias partes, como se muestra en la Figura 5.13.



Figura 5.13. (a) Parte exterior de la llanta modular; (b) módulo central.

Las principales modificaciones consistieron en instalar tres nuevas válvulas (ver Figura 5.14) para la extracción y guiado de los cables de los sensores de deformación a través de las mismas y poder conectarlos al equipo de adquisición de datos fijado en la parte exterior de la llanta.



Figura 5.14. Instalación de válvulas en la llanta.

➤ **Resultado final**

El montaje del neumático en la llanta es una de las partes más críticas, ya que tanto el cableado como las bandas extensométricas pueden resultar dañadas. Aunque se realizó con el máximo cuidado posible, durante el proceso algunos cables fueron dañados, haciendo que algunas bandas resultasen inservibles.

Una vez realizado el montaje, tanto el interior como el exterior de la llanta fueron sellados para garantizar que no se producía ningún escape de aire a través de los huecos de las válvulas. Asimismo, también fue sellada con adhesivo (cianocrilato) la zona de contacto entre la llanta y el neumático para garantizar la estanqueidad (ver Figura 5.15). Para comprobarlo, se infló a una determinada presión y se dejó durante horas para verificar que no se producían pérdidas de presión notorias.



(a)



(b)

Figura 5.15. (a) Holgura del neumático sin inflar; (b) neumático inflado sin holgura.

Finalmente, para evitar la interferencia del equipo de adquisición con los distintos equipos de ensayo, fue necesario unirlo a la llanta interiormente, como se muestra en la Figura 5.16. Este peso añadido fue compensado previamente a la realización de ensayos mediante el equilibrado del neumático.



(a)



(b)

Figura 5.16. (a) Lado izquierdo del neumático (en sentido de giro); (b) lado derecho con el Somat® 2000 sujeto en la llanta.

5.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

Con el objetivo de comparar el comportamiento del neumático tipo I con otro neumático de características similares, se adquirió el neumático AVON SLICK 175/53 R13 (neumático tipo II a partir de aquí), también sin cámara. Al tratarse de un neumático con características similares al anterior, es posible someterlo a similares condiciones de trabajo, principalmente en lo que a presión y fuerza vertical se refiere, ya que también es utilizado con frecuencia en competiciones como la *Formula Student* (FSAE). La principal diferencia con respecto al neumático tipo I es la altura del perfil, que es mayor en el neumático tipo II.

➤ Instalación de sensores

Se instalaron sensores en tres sets dispuestos radialmente a 120° , aproximadamente, como se observa en la Figura 5.17.



Figura 5.17. Localización radial de las bandas extensométricas en el neumático tipo II.

Para evitar el montaje y desmontaje del neumático una vez los sensores fueran instalados, se decidió colocar sensores en distintas posiciones con el propósito de que, si alguno resultaba dañado durante el montaje del neumático o durante los ensayos, siguiera habiendo disponible algún otro para finalizar los ensayos propuestos.

Antes de describir el proceso de instalación y pegado de bandas extensométricas en el interior del neumático, es importante tener en cuenta que se utilizaron dos tipos de adhesivos debido a la gran influencia que pueden tener, no sólo porque son directamente responsables de que los sensores se mantengan pegados a la zona de estudio durante, al menos, la totalidad de los ensayos, sino también porque, en caso de ser excesivamente rígido, podrían atenuar la señal de deformación obtenida, ocultando parte de la información. Además de cianocrilato, considerado como muy rígido, se utilizó el adhesivo bicomponente M-Bond AE 10, compuesto por el propio adhesivo y por un acelerante. Este adhesivo, compuesto únicamente de resinas epoxy (sin disolventes), es específico para este tipo de aplicaciones y posee una capacidad de elongación de hasta el 10%.

Con respecto al pegado de las bandas extensométricas, cabe señalar que la superficie fue lijada y posteriormente limpiada con alcohol para eliminar grasas antes de aplicar el adhesivo, siguiendo las recomendaciones del fabricante para la correcta instalación de este tipo de sensores. Posteriormente, las bandas fueron pegadas dando el tiempo de curación necesario en función del tipo de adhesivo antes de probar su correcto funcionamiento.

Como se ha comentado anteriormente, para cada set se instalaron seis bandas extensométricas, dos a cada lado de la línea media de la banda de rodadura y otras dos en uno de los flancos, todas dispuestas perpendicularmente dos a dos.

Además, en la Figura 5.17 se observa como los flancos del neumático fueron marcados con las etiquetas *Face A* y *Face B*, para indicar en el etiquetado de los sensores a qué lado del plano medio longitudinal del neumático están instalados los sensores, y así facilitar el análisis de resultados.

En la Tabla 5.2 se lista el etiquetado de los neumáticos para su correcta identificación.

Tabla 5.2. Código de etiquetado de sensores para su correcta identificación.

Set	Posición	Dirección	Lado	Adhesivo	Distancia a línea media	Código
1	Banda de rodadura	x	A	M-10	6 cm	ε_{x_A1}
	Banda de rodadura	y	A	M-10	6 cm	ε_{y_A1}
	Banda de rodadura	x	B	M-10	6 cm	ε_{x_B1}
	Banda de rodadura	y	B	M-10	6 cm	ε_{y_B1}
	Flanco	x	B	Cianocrilato	-	ε_{xs_B1}
	Flanco	y	B	Cianocrilato	-	ε_{ys_B1}
2	Banda de rodadura	x	A	M-10	2 cm	ε_{x_A2}
	Banda de rodadura	y	A	Cianocrilato	2 cm	ε_{y_A2}
	Banda de rodadura	x	B	M-10	2 cm	ε_{x_B2}
	Banda de rodadura	y	B	Cianocrilato	2 cm	ε_{y_B2}
	Flanco	x	A	M-10	-	ε_{xs_A2}
	Flanco	y	A	M-10	-	ε_{ys_A2}
3	Banda de rodadura	x	A	Cianocrilato	4 cm	ε_{x_A3}
	Banda de rodadura	y	A	M-10	4 cm	ε_{y_A3}
	Banda de rodadura	x	B	Cianocrilato	4 cm	ε_{x_B3}
	Banda de rodadura	y	B	M-10	4 cm	ε_{y_B3}
	Flanco	x	B	M-10	-	ε_{xs_B3}
	Flanco	y	B	M-10	-	ε_{ys_B3}

A modo de ejemplo, se muestra esquemáticamente en la Figura 5.18 la localización de los mismos en la banda de rodadura para el set 1.

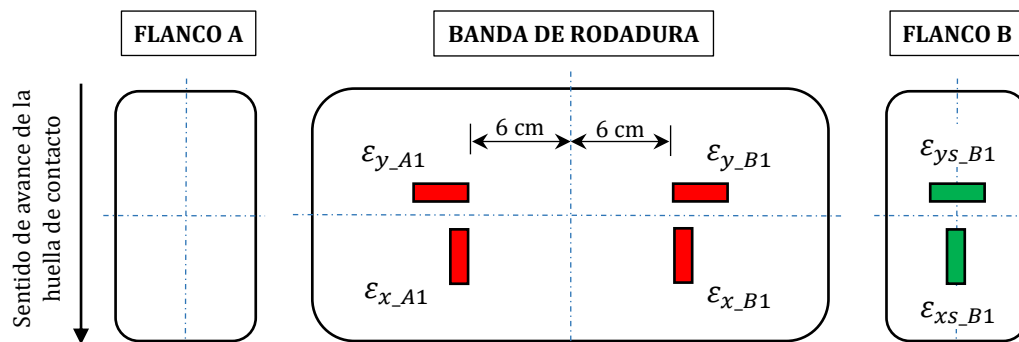


Figura 5.18. Disposición de los sensores en el set 1.

La disposición de los sensores en los sets 2 y 3 es idéntica al set 1, exceptuando la distancia al plano medio, el flanco en el que se han instalado sensores, y el adhesivo utilizado. Nótese que las bandas extensométricas pegadas con el adhesivo M-Bond 10 han sido marcadas en rojo, mientras que las pegadas con cianocrilato están en verde.

En la Figura 5.19 (a) se muestra la instalación de los sensores en la banda de rodadura. Se observa también cómo los cables de las bandas extensométricas fueron protegidos con cinta multipropósito para evitar tirones en las mismas durante el montaje del neumático en la llanta.

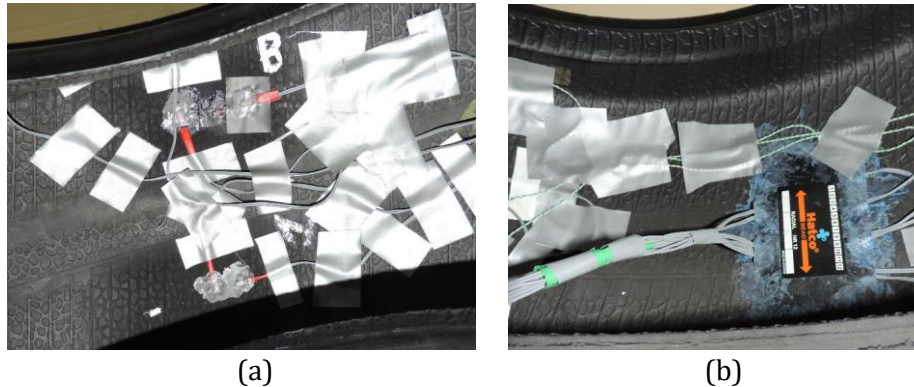


Figura 5.19. (a) Pegado de bandas extensométricas en el set 1; (b) protección de los cables con parches.

Además de la cinta multipropósito, para la protección de los sensores se utilizaron parches para reparar pinchazos de neumáticos con adhesivo vulcanizante, como muestra la Figura 5.19 (b).

➤ Equipo de adquisición de datos

El equipo de adquisición de datos utilizado en la segunda fase experimental fue el Slice Micro DTS® (Diversified Technical Systems, Seal Beach, CA, USA) (ver Figura 5.20).

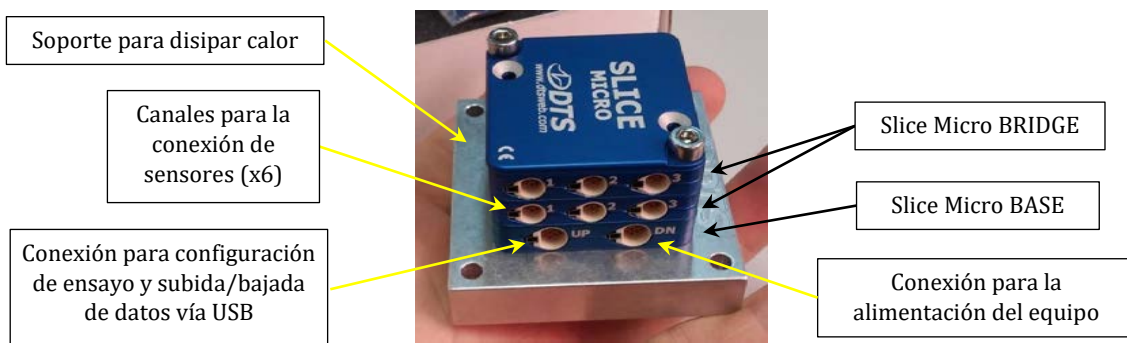


Figura 5.20. Elementos principales del equipo de adquisición Slice Micro DTS®.

Como se muestra en la Figura 5.20, el equipo consta de una base (Slice Micro BASE, que contiene el microprocesador, amplificador de señal y convertidor A/D) sobre la que se montan módulos de 3 canales cada uno (Slice Micro BRIDGE). Además, es posible incorporar baterías de larga duración, que posibilitan la toma de medidas de forma ininterrumpida durante varios días.

Este equipo es uno de los más pequeños y robustos del mercado, siendo único en lo que a prestaciones se refiere. Entre sus características más relevantes destacan la frecuencia de muestreo (hasta 500 kHz), su robustez (soporta aceleraciones de 500 g) y su tamaño (4,2 cm de lado y aproximadamente 3 cm de alto). Esta última característica fue una

de las más importantes a la hora de seleccionar este equipo para la 2ª fase experimental, dado que su tamaño reducido posibilita su instalación en el interior del neumático, no teniendo que pasar los cables de los sensores a través de la llanta, como se hizo en la 1ª fase experimental.

En general, la utilización de este equipo favorece situaciones en las que se pretende medir en condiciones dinámicas, con espacio reducido y que requieren frecuencias de muestreo elevadas para la captación de fenómenos tales como la aceleración o la deformación en impactos. Además, es especialmente interesante para aplicaciones en las que se necesita fijar el equipo cerca del elemento a ensayar debido a su peso reducido.

El conexionado básico que se requiere para la utilización del sensor es, además de los cabezales específicos para la conexión de los sensores, un cable USB, que se conecta a la conexión UP, y otro para la alimentación del equipo, que se conecta al DN (ver Figura 5.20). El Slice Micro DTS® lleva equipado un bornero denominado *End of Chain* (EOC), el cual permite iniciar un ensayo de forma remota, alimentar el equipo mediante una fuente de alimentación externa y comprobar el estado del equipo (si está registrando datos, está preparándose para grabar o se están modificando parámetros de ensayo en el software). Sin embargo, la utilización del EOC no es estrictamente necesaria, por ello, se decidió conectar directamente a la conexión DN del equipo de adquisición una batería para alimentarlo.

Esta batería, debido al espacio reducido en el interior de la rueda, se instaló en el exterior de la rueda, realizando el conexionado con el equipo de adquisición a través de conectores estancos, como se muestra en la Figura 5.21.

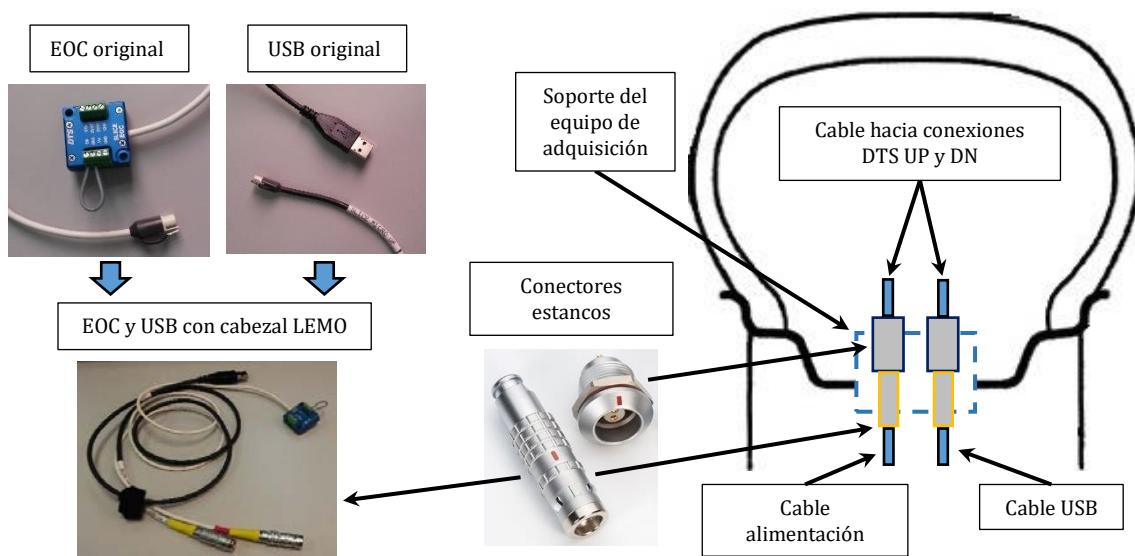


Figura 5.21. Modificación cables de conexionado del Slice Micro DTS®.

Resulta evidente que la utilización del EOC cuando el neumático está girando a alta velocidad supondría una dificultad añadida, salvo que se sujetase de algún modo a la llanta. Por ello, y dado que la principal función del EOC es alimentar el equipo de adquisición con una fuente de alimentación, se decidió no utilizar este elemento y sustituirlo por un cable que fuese directamente conectado a una batería y a un conector (soldando únicamente los cables para el +V y la conexión a tierra). De este modo, el equipamiento se simplifica y se evita la utilización del EOC.

En la Figura 5.21 se indica también el soporte para el equipo de adquisición de datos. Este soporte, que sustituyó a la base original (ver Figura 5.20), fue diseñado y posteriormente fabricado para garantizar la estanqueidad de la rueda, disipar el calor procedente del equipo de adquisición y permitir la configuración y alimentación del equipo desde el exterior de la rueda con el neumático inflado. El diseño y fabricación de este soporte, así como la preparación de la llanta, se describe de forma detallada en el siguiente apartado.

En cuanto al software, el Slice Micro DTS® cuenta con un software propio (Sliceware) que permite controlar el equipo de adquisición, iniciar los ensayos y descargar posteriormente los datos.

En la Figura 5.22 se muestra la interfaz del software del equipo de adquisición. En la ventana principal se pueden especificar las características de los sensores (sensibilidad, alimentación, rango, etc.) así como la frecuencia de muestreo de los ensayos.

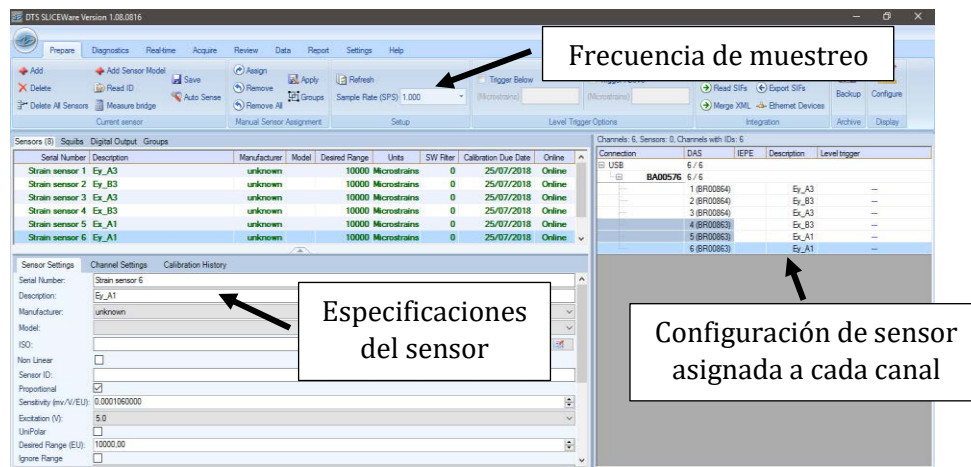


Figura 5.22. Interfaz de Sliceware.

➤ Preparación de la llanta y del soporte del equipo de adquisición

La llanta utilizada para el montaje del neumático tipo II se muestra en la Figura 5.23 (a). La principal diferencia constructiva con respecto a la llanta utilizada en los ensayos realizados con el neumático tipo I es que esta llanta no es separable, sino que se compone de un único cuerpo (monobloque) con una amplia zona sin altibajos en lo que al contorno se refiere, como se muestra en la Figura 5.23 (b).



(a)



(b)

Figura 5.23. (a) Llanta monobloque, (b) contorno de la llanta.

Aprovechando esta zona de radio constante, con la intención de mejorar la robustez de la instrumentación del neumático, se diseñó un soporte (ver Figura 5.24) para la instalación del equipo de adquisición que permite la extracción del mismo sin desmontar el neumático de la llanta, así como soldar y desoldar los cables de las bandas extensométricas en función de los sensores que se quieran utilizar para cada ensayo. Este soporte, que se compone de dos piezas, se fija mediante tornillos al marco, mientras que éste se une también mediante tornillos a la llanta.

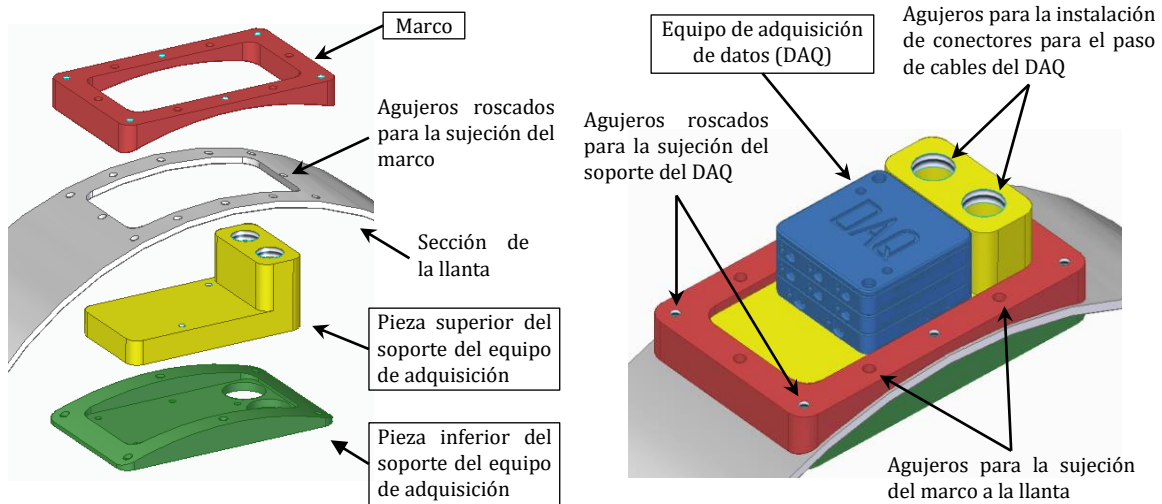


Figura 5.24. Diseño del soporte y distribución de los agujeros para su sujeción a la llanta.

Los requerimientos tenidos en cuenta para el diseño del soporte, el marco y la ventana de la llanta fueron varios, entre los que destacan:

- debía ser lo más pequeño posible para lograr un peso reducido;
- debía caber en el ancho disponible en la sección de igual radio de la llanta;
- los tornillos del marco debían ser capaces de soportar las fuerzas axiales resultantes del centrifugado de la rueda;
- los tornillos del soporte debían ser capaces de apretar lo suficiente el mismo para evitar el escape de aire a través de la junta exterior;
- el soporte debía ser manejable para la introducción y extracción del mismo a través de la ventana y;
- el diseño general debía garantizar un espacio de supervivencia para el dispositivo, teniendo en cuenta que cuando el neumático está sometido a distintas fuerzas, el espacio interior se reduce considerablemente.

Una vez logrado el diseño definitivo del soporte, se mecanizó la llanta para la abertura de una ventana que posibilite su instalación, como se muestra en la Figura 5.25.



Figura 5.25. Proceso de mecanizado de la llanta.

Además, se realizaron taladros roscados en la parte diametralmente opuesta para la instalación de la batería del equipo de adquisición. El resultado final se muestra en la Figura 5.26.

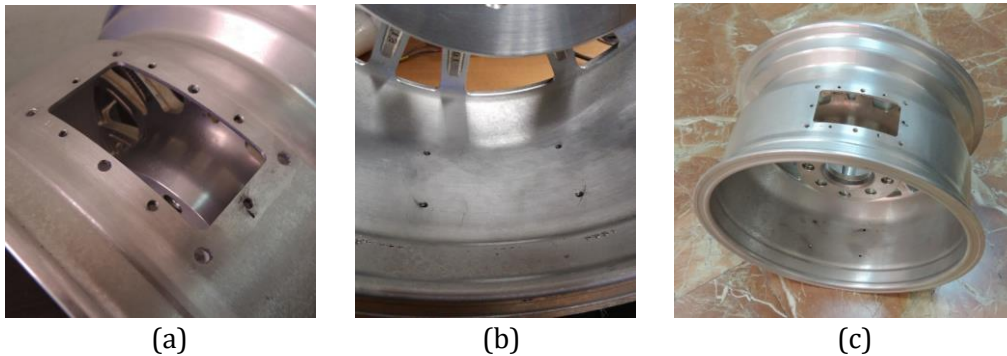


Figura 5.26. (a) Ventana y taladros para el soporte del equipo de adquisición, (b) taladros para la sujeción de la batería, (c) resultado final.

Los taladros realizados alrededor de la ventana (ver Figura 5.26 (a)) permiten, por un lado, la sujeción a la llanta del marco y, por otro, el paso de los tornillos desde el exterior para la sujeción del soporte del equipo de adquisición.

En cuanto al soporte del equipo de adquisición, se diseñó para mecanizarlo en dos piezas separadas (ver Figura 5.27), de forma que el mecanizado se lograra mediante las menores operaciones posibles y con el menor gasto de material.

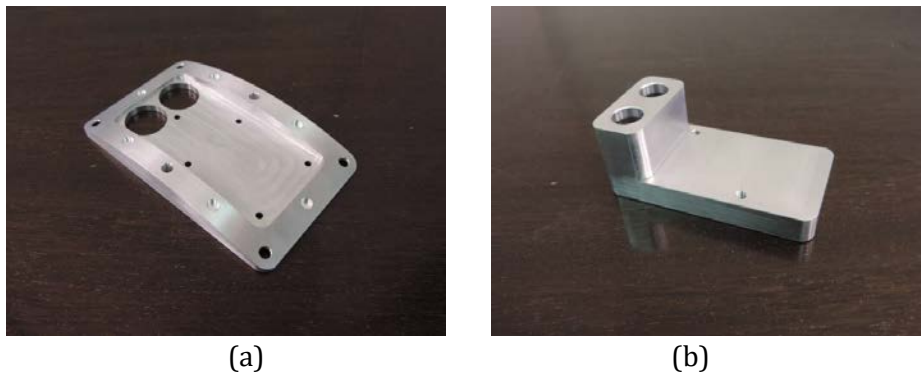


Figura 5.27. (a) Pieza inferior del soporte, (b) pieza superior del soporte.

Posteriormente se utilizó el sustituto universal de juntas para impedir el escape de aire a través de la unión, como se muestra en la Figura 5.28. Además, ambas piezas fueron unidas mediante tornillos para garantizar su unión durante los ensayos.

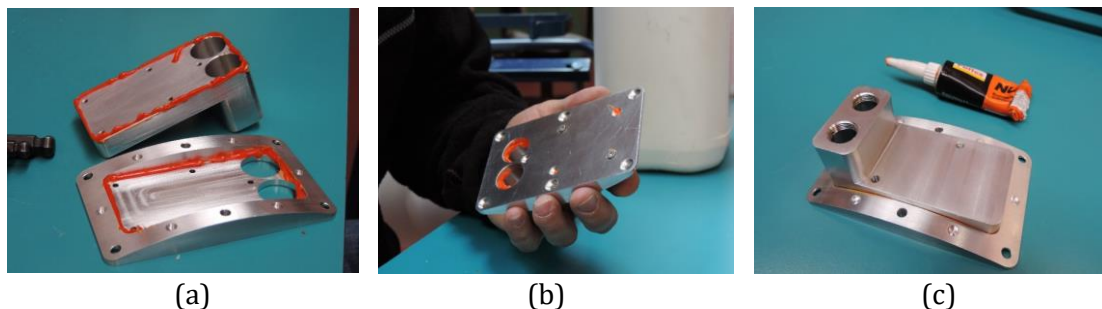


Figura 5.28. (a) Adición del sustituto universal de juntas en las piezas del soporte, (b) atornillado y eliminación de material sobrante (c) resultado final del soporte.

En la Figura 5.29 se muestra el encaje del soporte del equipo de adquisición y los taladros para el atornillado y fijación del soporte al marco situado sobre la llanta.

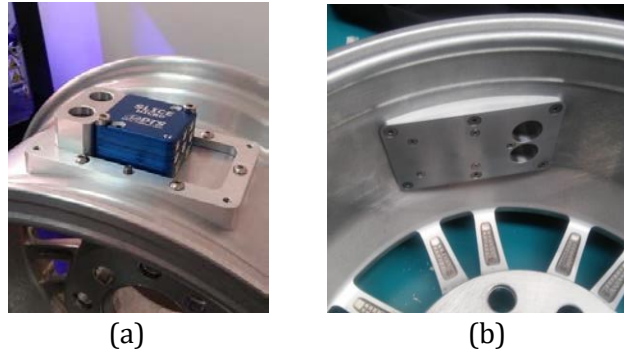


Figura 5.29. (a) Vista superior del encaje del soporte, (b) vista inferior.

Por último, cabe destacar que, como se observa en la Figura 5.29 (b), se podría producir el escape de aire en la unión entre el soporte para el equipo de adquisición y la llanta. Por ello, se diseñó y fabricó una junta a medida con una impresora 3D utilizando un material gomoso que, con un buen apriete de los tornillos del soporte, impide el escape de aire en esta unión (ver Figura 5.30).

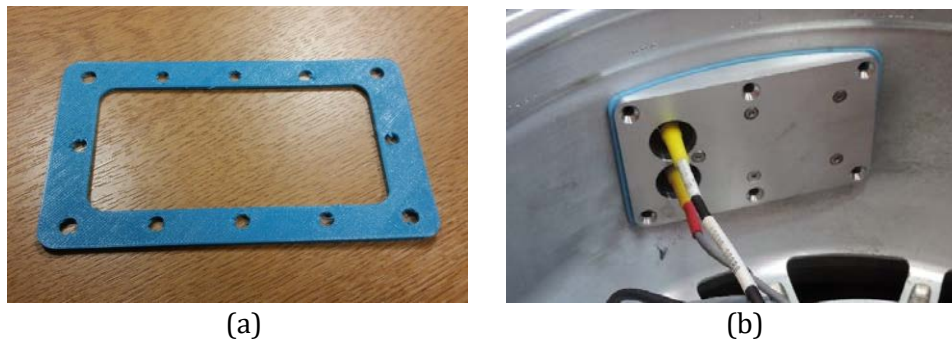


Figura 5.30. (a) Junta diseñada a medida, (b) junta instalada en el soporte.

En cuanto a la sujeción de la batería, se diseñó un modelo por ordenador (ver Figura 5.31 (a)) para fabricarlo posteriormente con una impresora 3D. El soporte de la batería se fabricó con plástico PLA en vez de con aluminio, con el consiguiente ahorro de material, mano de obra y tiempo. Los cálculos (previos a la fabricación) de la resistencia estructural de este soporte a los esfuerzos derivados de los ensayos se realizaron analíticamente y se muestran al final de esta sección. Finalmente, se aplicó sustituto universal de juntas para garantizar la estanqueidad de los taladros realizados en la llanta, como se observa en la Figura 5.31 (b).

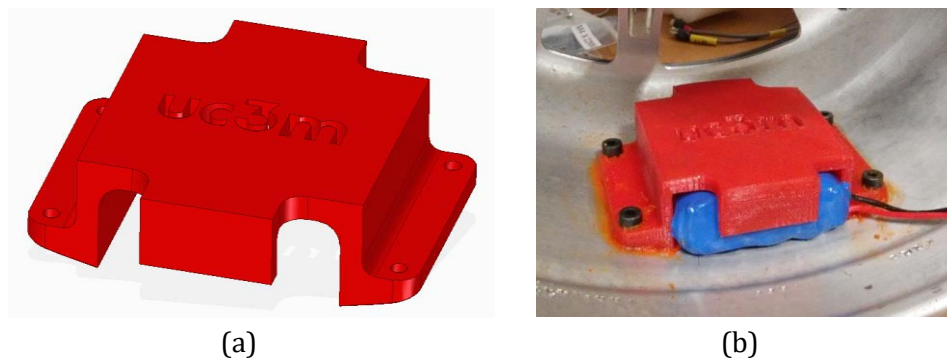


Figura 5.31. (a) Modelo CAD del soporte de la batería, (b) resultado final y fijación a la llanta.

➤ Resultado final

En la Figura 5.32 se muestra el resultado final. Una vez se montó el neumático, se probaron varios sensores para comprobar que no habían resultado dañados.



Figura 5.32. Extracción de los cables de las bandas a través de la ventana y conexión con el equipo de adquisición.

Finalmente, en la Figura 5.33 se muestra el neumático tipo II preparado para la realización de ensayos, con la batería rígidamente fijada a la llanta y los cables salientes del soporte para la alimentación del equipo de adquisición y el cable USB para la configuración de los ensayos en el equipo de adquisición. Estos cables fueron adheridos a la llanta para evitar dañarlos durante los ensayos.



Figura 5.33. Neumático tipo II instrumentado.

➤ Cálculo de la resistencia de las uniones atornilladas

El conjunto de piezas que componen el ensamblaje para la sujeción del equipo de adquisición de datos en el interior de la llanta se compone de diferentes uniones atornilladas. Tomando como referencia los elementos mostrados en la Figura 5.24, la pieza superior del soporte cuenta con dos tornillos para la sujeción directa del DAQ más cinco que unen este soporte con el inferior. Este soporte inferior cuenta con seis agujeros pasantes, los cuales, en su prolongación en la llanta y el marco instalado sobre la llanta, son roscados. Por otro lado, el marco tiene seis agujeros roscados que permiten la unión entre esta pieza y la llanta. El conjunto cuenta con varias uniones atornilladas sometidas a esfuerzos axiales, cortantes y de aplastamiento entre las uniones metálicas. Debido a que el objetivo principal de las uniones atornilladas es garantizar la estanqueidad de la llanta, el coeficiente de seguridad obtenido para las distintas uniones muestra que la resistencia de los elementos empleados está por encima de los esfuerzos a los que están sometidos.

En la primera sección de este apartado, se lleva a cabo el cálculo del coeficiente de seguridad para el caso de las uniones atornilladas de la pieza inferior del soporte (ver Figura 5.24) del equipo de adquisición con la llanta y el marco. En la segunda sección, se calcula el

coeficiente de seguridad de la estructura que sujeta la batería a la llanta (ver Figura 5.31). Esta estructura, hecha con PLA mediante impresión 3D, tiene propiedades mecánicas muy inferiores a las del aluminio, por lo que se calculará el coeficiente de seguridad de los puntos más críticos teniendo en cuenta varias estimaciones y simplificaciones. Finalmente, es importante destacar que el cálculo detallado de la primera sección para las uniones atornilladas del soporte inferior del DAQ se ha dado por válido para los tornillos que sujetan la estructura que sujeta la batería a la llanta.

➤ **Calculo del coeficiente de seguridad de las uniones atornilladas del soporte inferior del DAQ**

Las uniones atornilladas del soporte inferior del DAQ que se mostró en la Figura 5.24 están sometidas a esfuerzos axiales, cortantes y de aplastamiento (es decir, que el contacto entre dos superficies metálicas pueda producir una deformación significativa en alguna de las dos superficies). Sin embargo, sólo se van a tener en cuenta los dos primeros, debido a que el par de apriete al que se va a someter a los tornillos no va a ser el máximo admisible por los mismos, y entre las superficies metálicas de la llanta y el soporte inferior del equipo de adquisición existe una junta de goma (ver Figura 5.30) que amortigua los impactos y reduce la presión del contacto.

Los tornillos utilizados son de cabeza avellanada con hueco hexagonal de métrica M4 y calidad 8.8. Este tipo de tornillo tiene una resistencia a la tracción de 5620 N ($F_{t,Rd}$) [74].

Como el esfuerzo axial viene dado por la fuerza centrífuga, se calcula su valor mediante la Ec. 1 para cada tornillo:

$$F_{ct} = \frac{m_{total} \cdot v^2}{R_{llanta} \cdot n_t} = \frac{0,4 \cdot 8,333^2}{0,161 \cdot 6} = 28,74 \text{ N} \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

- v es la velocidad lineal máxima a la que se someterán las uniones;
- m_{total} es la masa total del conjunto DAQ-Soporte de aluminio;
- R_{llanta} es el radio de la llanta y;
- n_t es el número de uniones atornilladas.

Por lo tanto, la fuerza centrífuga calculada en la Ec. 1 es claramente inferior a la resistencia a la tracción de los tornillos ($F_{t,Rd}$).

Por otro lado, el soporte está sometido a un esfuerzo cortante debido a la fuerza tangencial producida por par el giro de la rueda (N), que se puede expresar según la Ec. 2 [75]:

$$N = \iint_a^b R \cdot c_{fag} \cdot P \cdot dS = R_{llanta} \cdot c_{fag} \cdot (Pa_T/A_{cs}) \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

- A_{cs} es el área de contacto entre el soporte inferior del DAQ y la llanta;
- Pa_T es el par de apriete total de los tornillos;
- R_{llanta} es el radio de la llanta y;
- c_{fag} es el coeficiente de rozamiento entre el aluminio y la junta de goma.

Como el par de giro de la llanta expresado en la Ec. 2 está relacionado con la potencia de giro de la llanta y la fuerza tangencial (F_t) que lo produce, ésta última se puede calcular de la siguiente forma:

$$F_t = \frac{\text{Potencia}}{w \cdot R_{llanta}} = \frac{N \cdot w}{w \cdot R_{llanta}} = \frac{N}{R_{llanta}} = 3409,95 \text{ N} \quad \text{Ec. 3}$$

Conocido el valor de la fuerza tangencial, la resistencia a cortante de los tornillos ($F_{V,Rd}$) se obtiene mediante la siguiente expresión [76]:

$$F_{V,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A_{rt}}{\gamma_{Mb}} = 19,30 \text{ kN} \quad \text{Ec. 4}$$

donde:

- f_{ub} es la tensión última a tracción de los tornillos;
- A_{rt} es el área resistente a tracción de los tornillos;
- γ_{Mb} es el coeficiente parcial de seguridad de los tornillos;

Como se muestra, la fuerza tangencial (F_t) calculada con la Ec. 3 es claramente inferior a la resistencia a cortante de los tornillos ($F_{V,Rd}$) calculada mediante la Ec. 4.

Para asegurar que las uniones atornilladas resisten tanto los esfuerzos a tracción como a cortante, se debe cumplir lo siguiente [76]:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1 \quad \text{Ec. 5}$$

donde:

- $F_{v,Ed}$ es el esfuerzo cortante que actúa sobre el tornillo (F_t);
- $F_{v,Rd}$ es la resistencia a cortante del tornillo;
- $F_{t,Ed}$ es el esfuerzo axial que actúa sobre el tornillo (F_c) y;
- $F_{t,Rd}$ es la resistencia a tracción del tornillo.

De la Ec. 5 se obtiene un valor de 0,03, muy por debajo del límite máximo admisible (1), garantizando la resistencia de las uniones atornilladas a las condiciones de los ensayos.

➤ Coeficiente de seguridad de la estructura de sujeción de la batería

Para el cálculo de la resistencia del soporte que sujeta la batería a la llanta se han realizado las siguientes simplificaciones:

- la fuerza tangencial se tomará como igual en todos los puntos de ensayo, teniendo en cuenta el caso más crítico y;
- la fuerza centrífuga está aplicada en el centro de la cara superior del soporte.

El diagrama de fuerzas y momentos flectores se representa en la Figura 5.34. Como se observa, se han considerado principalmente dos fuerzas: la fuerza centrífuga (F_c) debida al movimiento rotatorio de la masa del conjunto soporte-batería en torno al centro de la rueda y la fuerza tangencial (F_t) como fruto del par de giro de la rueda.

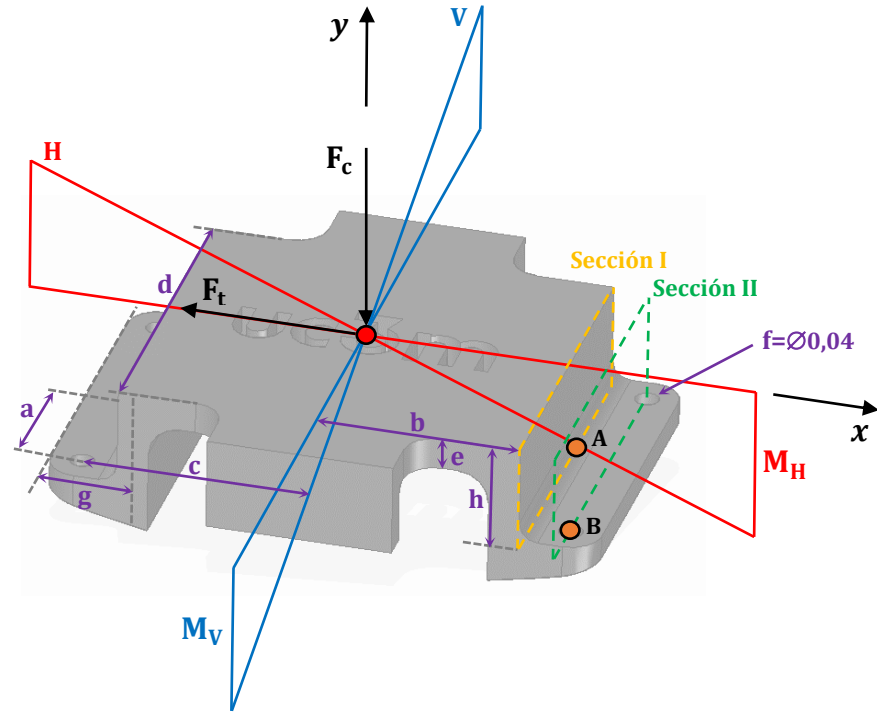


Figura 5.34. Diagrama de esfuerzos de la estructura que sujeta la batería.

Los puntos más críticos de la estructura son los indicados con las letras A y B en la Figura 5.34. Estos puntos están contenidos en la Sección I y II, respectivamente, el A en el punto medio del pliegue de la estructura y el B en centro de uno de los agujeros. Ambos estarán sometidos a los correspondientes momentos M_H y M_V .

Los datos necesarios para el cálculo se indican en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Datos para el cálculo del coeficiente de seguridad de la estructura de sujeción de la batería.

Dimensiones del soporte (m)		Otros datos	
a	0,0225	Velocidad	30 km/h → 8,333 m/s
b	0,0325	Masa de la batería y la estructura	0,150 kg
c	0,0395	Radio de la llanta	0,161 m
d	0,0554	Área total del contacto estructura-llanta	0,0013 m ²
e	0,0052	Coefficiente rozamiento aluminio-plástico	0,5
f	0,0040	Par de apriete/tornillo	3 Nm
g	0,0120	Nº agujeros y tornillos	4
h	0,0238	Límite de fluencia del PLA a 22°C	61 MPa

La fuerza centrífuga se calcula mediante la Ec. 6, que está en función de la velocidad máxima de giro (v), la masa total del conjunto batería-estructura ($m_{batería}$) y el radio de la llanta (R_{llanta}):

$$F_c = \frac{m_{batería} \cdot v^2}{R_{llanta}} = \frac{0,150 \cdot 8,333^2}{0,161} = 64,5 \text{ N} \quad \text{Ec. 6}$$

Los momentos producidos por la fuerza centrífuga en los puntos A y B son:

$$M_{H,A} = F_c \cdot b = 64,5 \cdot 0,0325 = 2,096 \text{ Nm}$$

$$M_{V,A} = 0$$

$$M_{H,B} = F_c \cdot c = 64,5 \cdot 0,0395 = 2,548 \text{ Nm}$$

$$M_{V,B} = F_c \cdot a = 64,5 \cdot 0,0225 = 1,451 \text{ Nm}$$

En cuanto a la fuerza tangencial, se ha considerado el área de contacto entre ambos elementos (A_c) y la presión existente en esa zona como fruto del par de apriete total de los tornillos (Pa_T), así como el radio de la llanta y el coeficiente de rozamiento entre el aluminio y el plástico (c_{fap}), de forma que la fuerza tangencial (F_t) se puede calcular mediante la Ec. 7:

$$F_t = \frac{c_{fap} \cdot R_{llanta} \cdot (Pa_T / A_c)}{R_{llanta}} = 4512,6 \text{ N} \quad \text{Ec. 7}$$

Suponiendo que esta fuerza estará distribuida por todos los puntos de la superficie de contacto entre los elementos y que las tensiones tangenciales se consideran nulas en el plano de trabajo, las tensiones principales en el pliegue de la Sección I (punto A) (ver Figura 5.34) son:

$$\begin{aligned} \sigma_{1,A} &= \frac{F_t/2}{d \cdot e} = 3,390 \text{ MPa} \\ \sigma_{2,A} &= \frac{M_{H,A} \cdot h}{I_x} = \frac{M_{H,A} \cdot h}{\frac{1}{12} \cdot d \cdot h^3} = 0,088 \text{ MPa} \\ \sigma_{3,A} &= 0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Para la Sección II (punto B), hay que tener en cuenta en el cálculo de las inercias (I_x y I_y) el área que ocupan los tornillos, restándola en el término correspondiente:

$$\begin{aligned} \sigma_{1,B} &= \frac{F_t/2}{d \cdot e - 2 \cdot e \cdot f} = 9,150 \text{ MPa} \\ \sigma_{2,B} &= \frac{M_{H,B} \cdot h}{I_x} - \frac{M_{V,B} \cdot a}{I_y} = \frac{M_{H,B} \cdot h}{\frac{1}{12} \cdot (d^3 \cdot h - 2 \cdot f^3 \cdot d)} - \frac{M_{V,B} \cdot a}{\frac{1}{12} \cdot (d \cdot h^3 - 2 \cdot f \cdot d^3)} = \\ &= -0,195 \text{ MPa} \\ \sigma_{3,II} &= 0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Una vez calculadas las tensiones principales, basta con considerar el límite de fluencia del material PLA (s_y) y aplicar las teorías del esfuerzo cortante máximo (criterio de Tresca, Ec. 8) y de la energía de distorsión (criterio de Von Mises, Ec. 9) para obtener el coeficiente de seguridad en cada sección:

$$Tresca \rightarrow \frac{\sigma_{1,A} - \sigma_{3,A}}{s_y} = \frac{1}{n} = 0,128 \quad \text{Ec. 8}$$

$$Von Mises \rightarrow \frac{\sqrt{\frac{(\sigma_{1,A} - \sigma_{2,A})^2 + (\sigma_{2,A} - \sigma_{3,A})^2 + (\sigma_{3,A} - \sigma_{1,A})^2}{2}}}{s_y} = \frac{1}{n} = 0,122 \quad \text{Ec. 9}$$

Por lo tanto, para la Sección I se obtiene mediante ambos criterios un coeficiente de seguridad (n) igual a 7,78 y 8,17, respectivamente.

Del mismo modo, para la Sección II:

$$Tresca \rightarrow \frac{\sigma_{1,B} - \sigma_{3,B}}{s_y} = \frac{1}{n} = 0,150 \quad \text{Ec. 10}$$

$$Von Mises \rightarrow \frac{\sqrt{\frac{(\sigma_{1,B} - \sigma_{2,B})^2 + (\sigma_{2,B} - \sigma_{3,B})^2 + (\sigma_{3,B} - \sigma_{1,B})^2}{2}}}{s_y} = \frac{1}{n} = 0,151 \quad \text{Ec. 11}$$

Resultando un coeficiente de seguridad de 6,66 con la Ec. 10 y 6,59 con la Ec. 11.

Mediante este cálculo analítico, en el que se han supuesto varias simplificaciones al ser un cálculo orientativo previo a la fabricación y prueba del prototipo, se garantiza que el material de la estructura que sujeta la batería a la llanta aguanta sobradamente los esfuerzos a los que será sometido durante los ensayos de la segunda fase experimental.

5.3 Metodología de ensayo

5.3.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

Antes de realizar la batería de ensayos se realizaron medidas preliminares en condiciones estacionarias (sin procesos severos de aceleración o frenada) de línea recta y curva para comprobar el funcionamiento de las bandas extensométricas y el equipo de adquisición. Además, antes de realizar los ensayos, el sistema de medida fue calibrado y puesto a cero.

La resolución final de la señal de deformación era de 0,001 $\mu\epsilon$. Esta resolución permite, como se verá en el apartado de análisis de resultados, observar las diferencias en las curvas de deformación para las distintas condiciones de ensayo. Los ensayos preliminares corroboraron que la resolución y la repetitividad de las medidas eran adecuadas.

Antes de colocar el neumático en el tambor de ensayo, éste se infla a la presión correspondiente para la realización de cada ensayo. Posteriormente, se establecen las condiciones del ensayo en el equipo de adquisición (frecuencia de muestreo, etc.) mediante el software WinTCS a través de un cable de comunicación. Una vez se ha configurado, este cable se retira y se aplica la fuerza vertical al neumático y la velocidad de giro al tambor. Estos dos parámetros se fijan mediante un potenciómetro y el acondicionamiento de la señal se realiza a través de un ordenador (ver Figura 5.35).

Es importante destacar que, debido a que se sabía de antemano que la célula de carga longitudinal no funcionaba correctamente, los ensayos se realizaron de tal forma que el parámetro modificado una vez el neumático se posaba sobre el tambor era la fuerza vertical, dejando la velocidad constante una vez el tambor empezaba a girar.

Para los ensayos realizados en ambas fases experimentales, la frecuencia de muestreo se fijó en 1000 Hz, la cual es válida para recoger como mínimo 50 datos por cada revolución de la rueda a una velocidad de 100 km/h.

Una vez finalizado el ensayo, el tambor se para y se conecta el equipo de adquisición de nuevo al ordenador para visualizar y descargar los datos. Las condiciones limitantes para la realización de ensayo son tres: que haya transcurrido el tiempo suficiente de ensayo como

para decidir su finalización, que la memoria del equipo de adquisición esté completa o que se agote la batería del equipo. En la mayoría de los casos, el ensayo fue detenido debido a que se consideró suficiente el tiempo de ensayo, repitiendo aquellos en los que no fue así. El tiempo total de realización de ensayos fue superior a 50 h durante la primera fase experimental.

En la Figura 5.35 se muestra esquemáticamente el diagrama de flujo para la adquisición de datos y los distintos equipos utilizados.

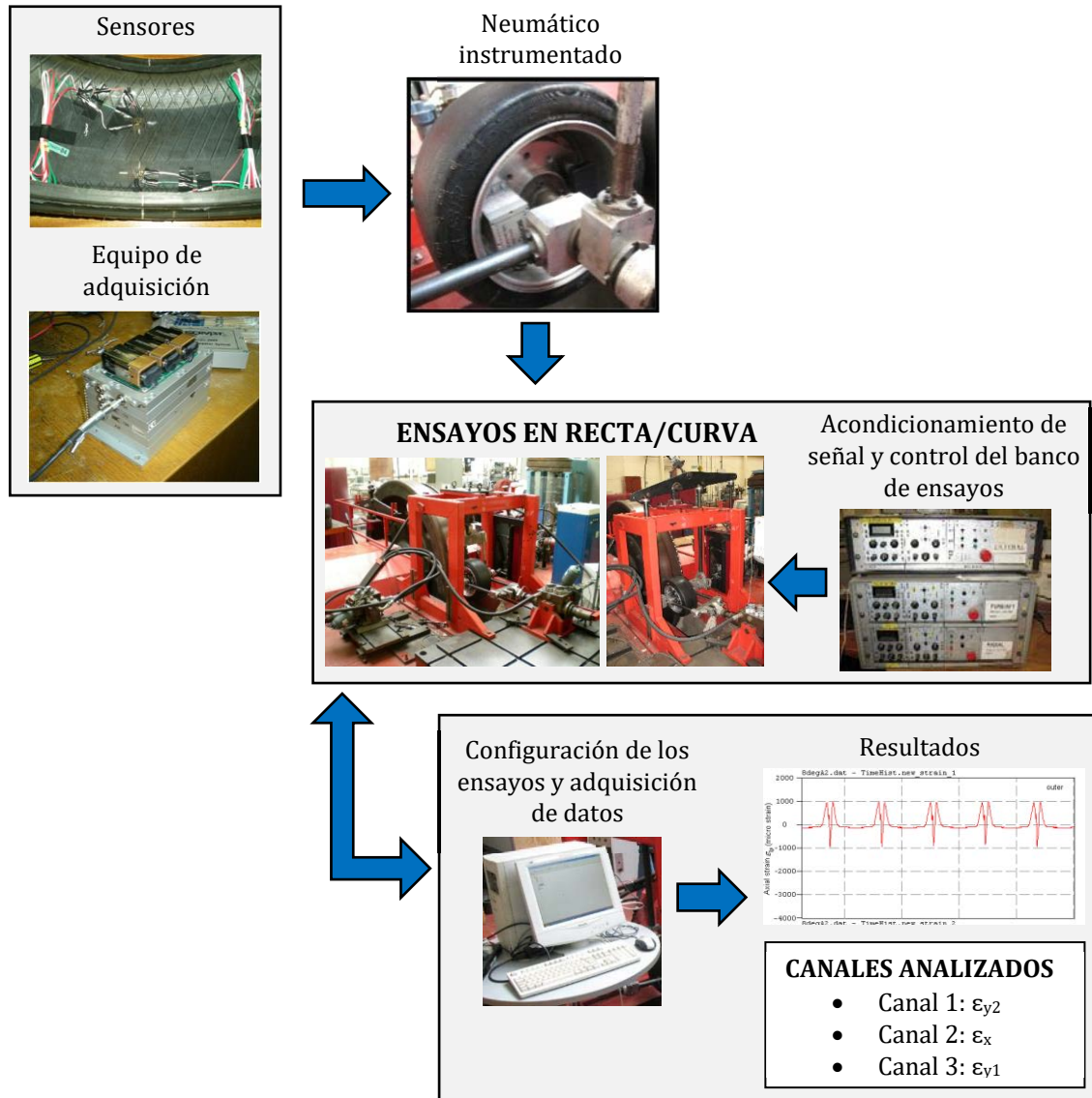


Figura 5.35. Metodología de ensayo con el neumático tipo I.

A modo de resumen, el procedimiento consiste en, inicialmente, configurar el equipo de adquisición instalado en la llanta para la realización del ensayo. A continuación, se fija la velocidad de rodadura del tambor y se posiciona el neumático mediante la bomba hidráulica sobre el mismo teniendo en cuenta la fuerza vertical que se quiere aplicar. Posteriormente, se varía la fuerza vertical progresivamente dejando rodar el neumático durante un cierto tiempo para obtener varios ciclos para cada condición de ensayo. Finalmente, se separa el neumático del tambor, descargando al ordenador los datos recogidos por el software del banco del ensayo y por el equipo de adquisición instalado en el neumático para su posterior análisis.

5.3.1.1 Condiciones de ensayo

Las condiciones de ensayo de la primera fase experimental fueron, para los ensayos en línea recta:

- Presión de inflado: 0,8 – 1,4 bar;
- Fuerza vertical: 250 N – 1000 N;
- Velocidad: 10 km/h – 50 km/h;
- Ángulo de deriva: 0°;
- Ángulo de caída: 0°.

Para a los ensayos en curva:

- Presión de inflado: 0,8 – 1,4 bar;
- Fuerza vertical: 250 N – 1000 N;
- Velocidad: 10 km/h – 50 km/h;
- Ángulo de deriva: 0° - 14°;
- Ángulo de caída: 0°.

Las condiciones de trabajo se variaron en incrementos de 0,2 bar, 250 N, 10 km/h y 2°.

5.3.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

Del mismo modo que en la primera fase experimental, se realizaron algunos ensayos previos para verificar que la señal obtenida por los sensores era correcta, que la presión de inflado se mantenía constante durante al menos el tiempo de realización de ensayos, y que la frecuencia de muestreo era adecuada para las condiciones de ensayo establecidas.

Con respecto a la presión de inflado, se infló el neumático a una presión de 1,4 bar y se dejó reposar el neumático durante 48h, midiendo que el neumático no había perdido presión de forma alarmante.

La resolución de las bandas extensométricas es de 0,001 $\mu\epsilon$, mientras que la frecuencia de muestreo se fijó en 1000 Hz, al igual que en la primera fase experimental.

En la Figura 5.36 se muestra un diagrama que resume el procedimiento llevado a cabo.

Del mismo modo que en la primera fase experimental, inicialmente se configuraba el equipo de adquisición instalado en la llanta para las condiciones del ensayo correspondiente. A continuación, se hacía rodar el tambor a baja velocidad, pasa posteriormente posicionar el neumático sobre el mismo e iniciar la adquisición de datos con el software utilizado para controlar el tambor y con el software del equipo de adquisición instalado en la llanta. Posteriormente, se incrementaba la velocidad en intervalos de 10 km/h, manteniendo la fuerza vertical constante. Finalmente, se separaba la rueda del tambor para descargar los datos y analizarlos.

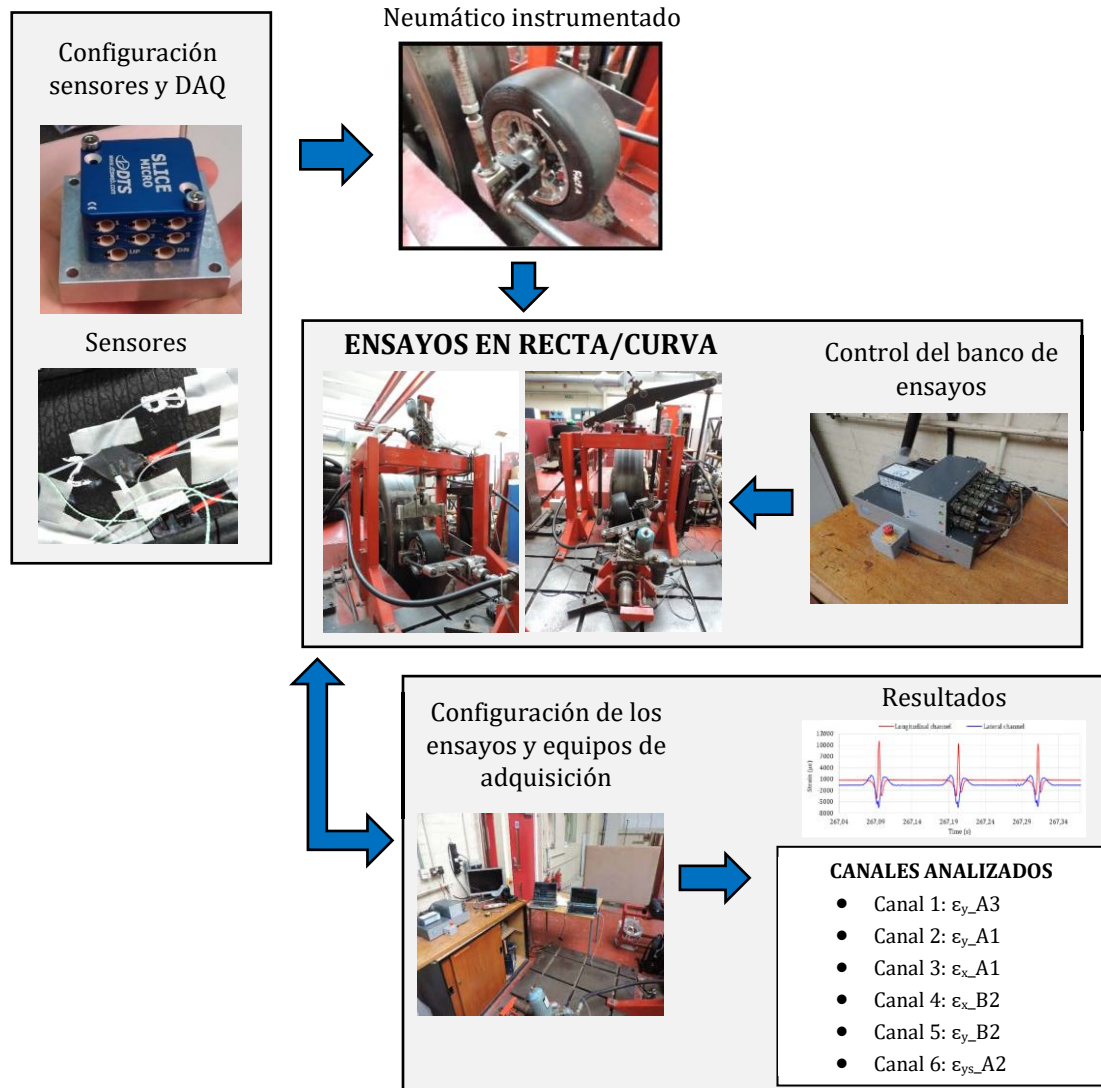


Figura 5.36. Diagrama del procedimiento llevado a cabo en los ensayos de la segunda fase experimental.

Como se ha descrito, los ensayos se realizaron con un ángulo de caída. Este hecho se observa en la Figura 5.37, produciendo como consecuencia que el neumático apoye más sobre un lado de la banda de rodadura que sobre otro.

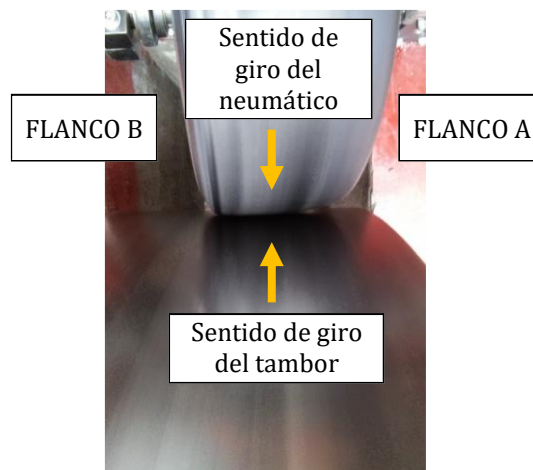


Figura 5.37. Vista en planta superior del neumático tipo II apoyado sobre el tambor con ángulo de caída.

5.3.2.1 Condiciones de ensayo

Las condiciones de ensayo de la segunda fase experimental fueron, para los ensayos en línea recta:

- Presión de inflado: 0,8 – 1,4 bar;
- Fuerza vertical: 250 N – 1000 N;
- Velocidad: 10 km/h – 30 km/h;
- Ángulo de deriva: 0°;
- Ángulo de caída: 5°.

En cuanto a los ensayos en curva:

- Presión de inflado: 0,8 – 1,4 bar;
- Fuerza vertical: 250 N – 1000 N;
- Velocidad: 10 km/h – 30 km/h;
- Ángulo de deriva: 0° - 8°;
- Ángulo de caída: 5°.

Las condiciones de trabajo se variaron en incrementos de 0,2 bar, 250 N, 10 km/h y 2°. El motivo por el cual la velocidad de rodadura se limitó a 30 km/h fue porque el banco de ensayos requería tareas de mantenimiento para poder realizar ensayos a velocidades superiores a la indicada al sufrir problemas de sobrecalentamiento. Por otro lado, el rango del ángulo de deriva se estableció de 0° a 8° ya que aumentarlo supondría un riesgo para el neumático, debido a que la abrasión en el mismo sería muy alta debido al ángulo de caída.

Capítulo 6

Metodología de análisis

6.1 Estructura del análisis de resultados

El análisis de resultados se ha dividido principalmente en dos partes; por un lado, los resultados obtenidos con el neumático tipo I (primera fase experimental) en los que el ángulo de caída es cero; por otro, los obtenidos con el neumático tipo II (segunda fase experimental), en los que los ensayos se llevaron a cabo con un cierto ángulo de caída en el neumático.

Como se mencionó en apartados anteriores, en los ensayos realizados con el neumático tipo I, las series temporales obtenidas para cada ensayo muestran a simple vista las variaciones que produce la fuerza vertical en las curvas de deformación, ya que fue el parámetro modificado durante la rodadura del neumático. Sin embargo, las series temporales obtenidas con el neumático tipo II muestran los efectos producidos por el cambio de velocidad en las curvas de deformación. A modo de ejemplo, en la Figura 6.1 se muestra cómo la variación de la fuerza vertical influye directamente en la señal de deformación obtenida en los ensayos realizados en la primera fase experimental.

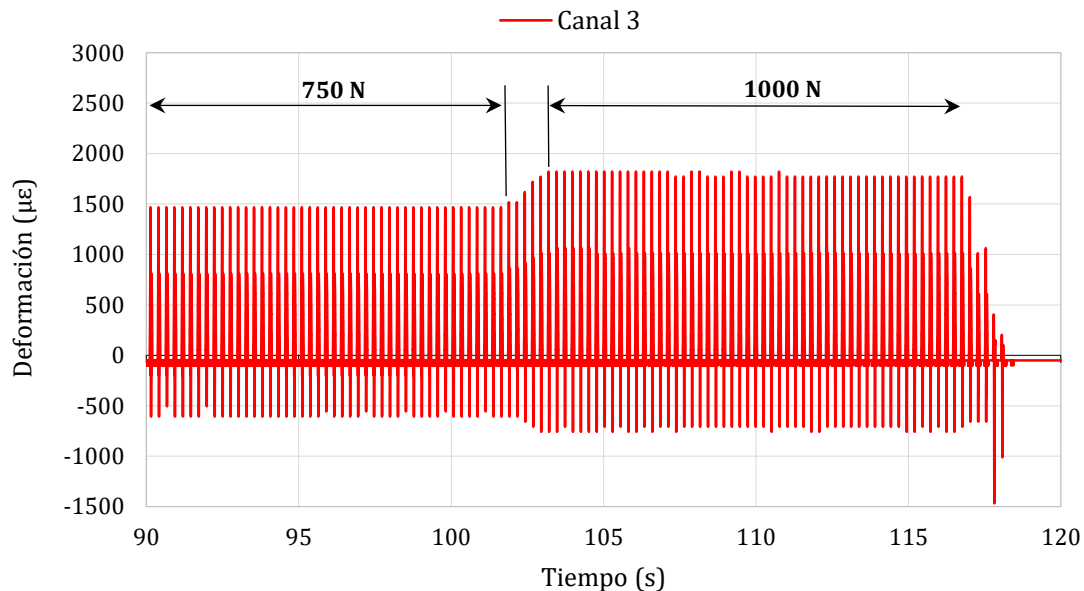


Figura 6.1. Efecto de la fuerza vertical en la señal de deformación en dirección lateral para 0,8 bar, 20 km/h y 750-1000 N.

En la Figura 6.2 se muestra el comportamiento típico de un neumático a su paso por la huella de contacto. Generalmente, existen tres zonas claras de deformación: la primera,

en la entrada de la huella de contacto, la segunda en la huella de contacto, y la tercera a la salida de la misma, donde se generan los mayores esfuerzos de tracción.

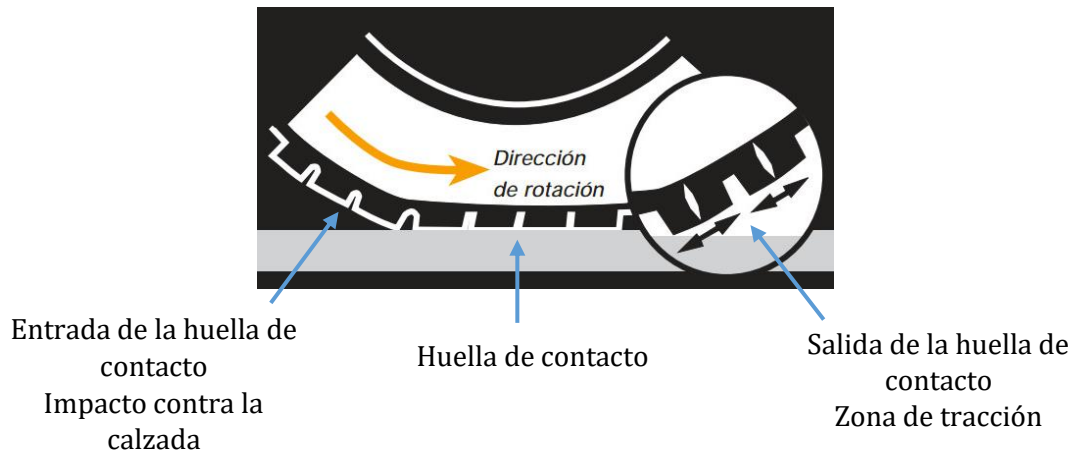


Figura 6.2. Deformación típica de la banda de rodadura al contactar con la calzada.

Mediante el análisis exhaustivo de los ensayos realizados se han identificado los puntos más significativos para cada curva de deformación obtenida. A simple vista, la Figura 6.3 muestra que la morfología de las curvas obtenidas (sean cuales sean las condiciones de los ensayos) permite sacar algunas conclusiones iniciales. Se han representado dos periodos completos (720°) para cada canal, observando que las curvas obtenidas en dirección longitudinal y lateral son muy diferentes, pero reflejan el comportamiento de la banda de rodadura del neumático mostrado en la Figura 6.2 de forma clara y consistente.

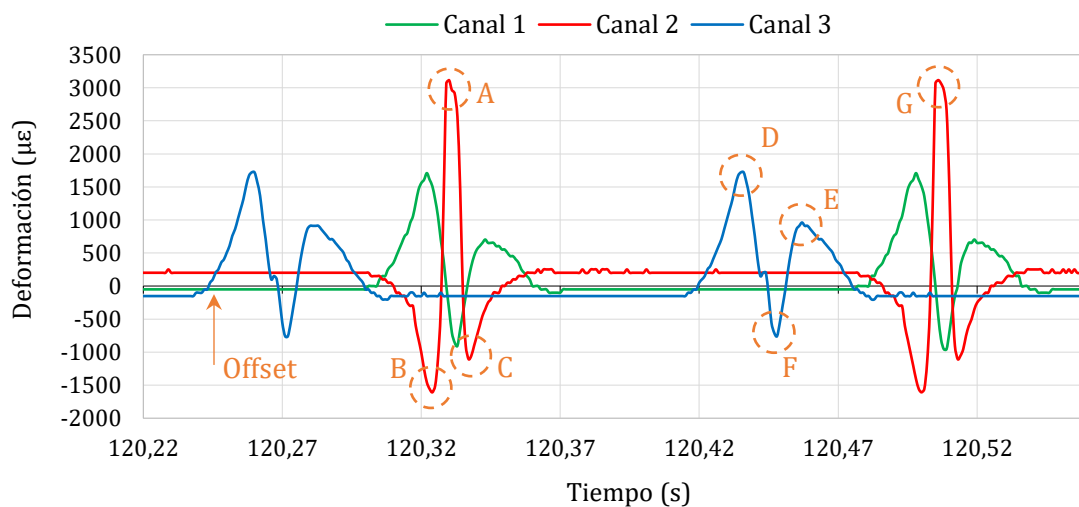


Figura 6.3. Ejemplo de la morfología de las curvas obtenidas.

En dirección longitudinal, como se observa en la Figura 6.3, se tienen tres puntos característicos; el pico de máxima tensión (A), situado en la parte central de la huella de contacto, justo en el momento en el que el neumático está apoyado sobre zona del neumático en la que está instalado el sensor (por cara interior de la banda de rodadura), es decir, cuando se produce el contacto neumático-tambor; y los picos de máxima compresión a la entrada y salida de la huella de contacto (B y C), que corresponden a valores registrados por el sensor cuando éste se acerca o se aleja de la huella de contacto, respectivamente.

En dirección lateral, por el contrario, se obtienen dos puntos de máxima tensión (D y E) a la entrada y salida de la huella de contacto, respectivamente, y un punto de máxima

compresión (F) que corresponde al punto de impacto del neumático con la superficie en la zona donde está instalada la banda extensométrica.

Además, en ambas direcciones se obtiene en la parte alejada de las propias curvas lo que, para abreviar, se ha denominado *offset*.

Si se observa, por ejemplo, el canal 2, la distancia entre los puntos A y G representa el tiempo que tarda el neumático en realizar una revolución, 360°, permitiendo obtener la velocidad angular de la rueda a partir del periodo de cualquiera de estas curvas. Esto hace posible eliminar los sensores que utilizan actualmente los sistemas ABS y que se sitúan en cada una de las ruedas junto a la mangueta, ya que el neumático inteligente puede dar la misma información, siempre y cuando se adquiera y procese adecuadamente.

En este punto es interesante destacar que los datos de deformación medidos cuando el neumático está rodando, así como la forma de las curvas mostradas en la Figura 6.3, cambian dependiendo de las condiciones de trabajo. Es decir, si el neumático está sometido a un par de frenado o se fija un determinado valor de presión de inflado o de velocidad de giro, esto se verá reflejado en la forma de la curva de deformación registrada. De este modo, es posible analizar la influencia de cada uno de los parámetros analizados en este estudio a partir de los valores máximos de deformación, por tracción o compresión, registrados con cada canal/sensor.

Dado que la deformación se genera debido a los esfuerzos en el neumático, especialmente aquellos que ocurren en el contacto neumático-pavimento, sus características juegan un importante papel en la estimación del comportamiento dinámico, el desgaste de la banda de rodadura y otras características. Por ejemplo, la deformación a tracción indicada en los picos D y E (ver Figura 6.3) cambia cuando el neumático se encuentra sometido a procesos de aceleración o frenado [21,34].

La influencia de las condiciones de trabajo en los puntos característicos de las curvas de deformación hace que el objetivo del estudio de estos puntos, mostrados en la Figura 6.3, sea buscar valores unívocos (o que queden acotados en un rango específico del conjunto de condiciones de funcionamiento de los ensayos), que proporcionen información de una única variable de influencia en el comportamiento de los neumáticos. De este modo, se caracterizaría el comportamiento de los puntos significativos de las curvas de deformación en función de los parámetros de funcionamiento. Este propósito supone la mayor dificultad del análisis de resultados, pero también permite validar la utilidad de las técnicas aplicadas para el desarrollo futuro del neumático inteligente.

6.1.1 Obtención de ciclos medios representativos

Por último, con el objetivo de comparar las curvas de deformación obtenidas, antes de comenzar el análisis de resultados se calculan las curvas medias de deformación que son representativas de cada una de las condiciones de ensayo. Para ello, se ha considerado la deformación media para cada punto del perímetro del neumático promediando los ciclos de forma individualizada para cada condición de ensayo. Por ejemplo, en la Figura 6.1, se observa como del segundo 90 al 100 el neumático está trabajando con unas determinadas condiciones de presión, velocidad y fuerza vertical, mientras que para los ciclos del 105 al 115 el neumático está sometido a mayor fuerza vertical. El trabajo realizado para el análisis de datos ha consistido en seleccionar un mínimo de 15 ciclos obtenidos bajo las mismas condiciones de trabajo y calcular un único ciclo medio que represente a todos ellos,

calculando la deformación media para cada punto de dicho ciclo, obteniendo un ciclo de puntos medios representativo.

Este trabajo, que puede parecer inmediato, ha requerido de la elaboración de un código específico en MATLAB/Simulink® (The Math-Works, Natick, MA, USA,) capaz de identificar y separar los ciclos para trabajar con ellos de forma separada. Aunque el concepto es sencillo, el hecho de que para cada velocidad el número de datos registrados cambie (al mantener constante la frecuencia de muestreo) aumenta la complejidad del proceso.

En total, sólo para los datos obtenidos en la primera fase experimental, se han calculado 240 curvas medias en los ensayos realizados en línea recta y 1.152 curvas para los ensayos en curva.

Los ciclos medios representativos se utilizan para dar generalidad al estudio y a la herramienta de estimación utilizada en sucesivos capítulos. Sin embargo, tras desarrollar el sistema de estimación correspondiente, se han empleado datos obtenidos de curvas reales con resultados satisfactorios, por lo que la aplicación de estos ciclos resulta ser adecuada.

El análisis de la influencia de las condiciones de trabajo en los puntos significativos indicados en la Figura 6.3 se detalla en profundidad en el próximo capítulo de esta Tesis Doctoral.

6.2 Influencia teórica de los parámetros de ensayo

Aunque son muchos los parámetros que influyen en el comportamiento dinámico de la banda de rodadura y el rendimiento del propio neumático, en este apartado se va a describir brevemente la importancia en el comportamiento de los neumáticos de las condiciones de trabajo que se han modificado durante los ensayos de la presente Tesis Doctoral, especialmente en la deformación de la banda de rodadura.

6.2.1 Presión

La presión de inflado tiene una influencia capital en el comportamiento de los neumáticos, y también sobre la deformación de la banda de rodadura. Cuando la presión es baja, el neumático puede contactar con la calzada únicamente por los hombros, levantando la parte central de la banda de rodadura. Por el contrario, si la presión es alta, el contacto se producirá en mayor medida en la parte central de la banda de rodadura. En cuanto a los valores de deformación, cabe esperar que un aumento de la presión dé como resultado una menor deformación, puesto que la rigidez del neumático aumenta.

6.2.2 Velocidad

La velocidad es un parámetro muy importante para el rendimiento y durabilidad de los neumáticos, además de ser un factor que afecta directamente a la adhesión del neumático al pavimento.

Cuando la velocidad aumenta, la fuerza centrífuga aumenta directamente la deformación de la banda de rodadura, en especial en los puntos del neumático que no están en contacto con la calzada. En términos de adherencia, el aumento de la velocidad disminuye

el tiempo que la huella de contacto está en contacto con la calzada y, por tanto, la adhesión entre el caucho y el asfalto se reduce, disminuyendo, por consiguiente, la adherencia.

6.2.3 Fuerza vertical

Las fuerzas estáticas y dinámicas que actúan sobre el neumático, son transmitidas a la superficie de rodadura a través de zona de contacto, en la que se genera una presión cambiante al influir de forma diferente a la estructura interna del neumático.

La distribución de presiones, cuando actúa únicamente una fuerza F_z , es simétrica respecto a los planos longitudinal y transversal que contienen al centro de la huella y son perpendiculares a la superficie de rodadura. Las presiones alcanzadas en el área de contacto pueden ser varias veces superiores a las de inflado.

En lo que respecta a la deformación del neumático, el aumento de la fuerza vertical aumenta la superficie de contacto del neumático con la calzada, por lo que el área de la huella de contacto es mayor. Esto, al mismo tiempo, implica que el apoyo del neumático sobre la calzada se realiza fundamentalmente a través de los hombros los hombros.

Finalmente, cabe destacar que, aunque se pudiera pensar que la fuerza vertical influye directamente en la adherencia del neumático, esto sólo se produce hasta un cierto ángulo de deriva a partir de la cual la adherencia disminuye.

6.2.4 Ángulo de deriva

Si un neumático rueda sometido exclusivamente a fuerzas verticales y fuerzas longitudinales (tracción o frenado), la dirección del movimiento coincide con el eje x (ver Figura 6.4) contenido en la línea media longitudinal del mismo. Cuando además de estas fuerzas, actúa una fuerza lateral (F_l) en dirección perpendicular a dicha línea media, debido a, entre otros motivos, la aceleración centrífuga en el paso por curva, el movimiento del neumático sigue una trayectoria que forma un ángulo α con el plano medio de la rueda. Ese ángulo α (ver Figura 6.4) se denomina ángulo de deriva, y puede definirse como el ángulo comprendido entre la dirección de avance del mismo y el ángulo que forma con la calzada.

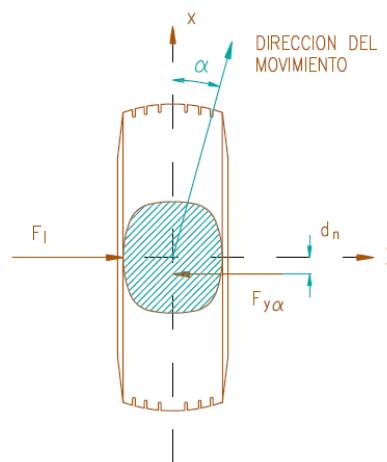


Figura 6.4. Esquema del comportamiento del neumático sometido a esfuerzos laterales [77].

Este fenómeno, denominado de deriva, es uno de los factores fundamentales en el control del vehículo y la estabilidad del mismo, cobrando gran importancia la relación existente entre la fuerza lateral y el ángulo de deriva.

6.2.5 Ángulo de caída

El ángulo de caída o inclinación de la rueda se define generalmente como “el ángulo que forma la mangueta con una línea horizontal situada en el plano vertical que pasa por este eje”, o lo que es lo mismo, el ángulo comprendido entre una vertical y el plano medio de la rueda.

La finalidad del ángulo de caída es optimizar la superficie de contacto entre el neumático y la calzada en función de las condiciones de trabajo del neumático, siendo en el mundo de la competición donde el ángulo de caída tiene mayor interés.

6.2.6 Fuerza lateral

Además de la señal de deformación obtenida directamente de los sensores instalados en el neumático, las células de carga instaladas en los actuadores que sujetan el neumático proporcionan información sobre la fuerza longitudinal (es decir, la resistencia a la rodadura) y transversal que se generan en el contacto neumático calzada. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, la célula de carga situada en el actuador vertical (que mide la fuerza longitudinal) no mostró resultados coherentes, por lo que el estudio se centra en el comportamiento de la fuerza lateral.

El neumático trabaja como una unión elástica entre la llanta (o el vehículo) y el suelo, por lo que, como si de un muelle se tratara, para transmitir una fuerza entre ambos elementos debe sufrir una deformación que tense su estructura en la dirección en la que dicha fuerza debe ser aplicada. En el caso de que se desee desplazar el vehículo en dirección lateral, el neumático sufrirá una serie de sollicitaciones transversales caracterizadas por el ángulo de deriva que darán lugar a una flexión lateral. Sin embargo, esta fuerza transversal o lateral resultante está afectada por múltiples factores, entre los que destacan la fuerza vertical o el ángulo de deriva, pero también otros como la superficie de rodadura o la temperatura.

A continuación, se detalla la influencia de las condiciones de trabajo controladas durante los ensayos en la fuerza transversal/lateral:

➤ **Velocidad**

La velocidad tiene una influencia muy pequeña sobre el comportamiento lateral de los neumáticos, sin embargo, a medida que aumenta, se produce mayor generación de calor, debido a las pérdidas de energía por histéresis. El aumento de temperatura ocasiona un incremento de la presión del aire y, por tanto, de la rigidez de deriva.

➤ **Presión de inflado**

De igual modo, la presión de inflado tiene una influencia moderada en las propiedades de deriva de los neumáticos, especialmente dentro de los márgenes usuales de aplicación. La rigidez de deriva aumenta con la presión de inflado, aunque su variación es pequeña, este efecto puede utilizarse para modificar las características direccionales del vehículo.

➤ **Fuerza vertical**

La fuerza vertical que actúa sobre el neumático afecta de manera importante a sus características de deriva. La consideración de este parámetro adquiere mayor importancia

en el estudio de la estabilidad y control de la trayectoria del vehículo (si se tiene en cuenta el efecto de transferencia de carga de unas ruedas a otras) durante la circulación en curva y en los períodos de aceleración y frenado.

En general, la fuerza transversal aumenta con la fuerza vertical para un valor constante del ángulo de deriva. Sin embargo, la capacidad del neumático para soportar esfuerzos transversales no es lineal, como se observa en la Figura 6.5.

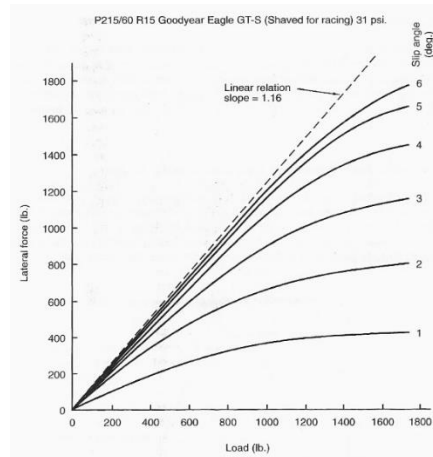


Figura 6.5. Influencia de la fuerza vertical en la capacidad de soportar esfuerzos transversales [78].

Se deduce que el aumento de la fuerza vertical disminuye la capacidad del neumático para soportar esfuerzos laterales.

➤ Ángulo de deriva

Cuando se gira el volante para trazar una curva, se induce un ángulo de deriva en el neumático. Con el aumento del ángulo de deriva, los esfuerzos laterales a los que está sometido el neumático también aumentan, dado que una mayor flexión requiere una mayor fuerza.

En el desarrollo del ángulo de deriva se distinguen tres etapas: lineal, de transición y deslizamiento, como se muestra en la Figura 6.6.

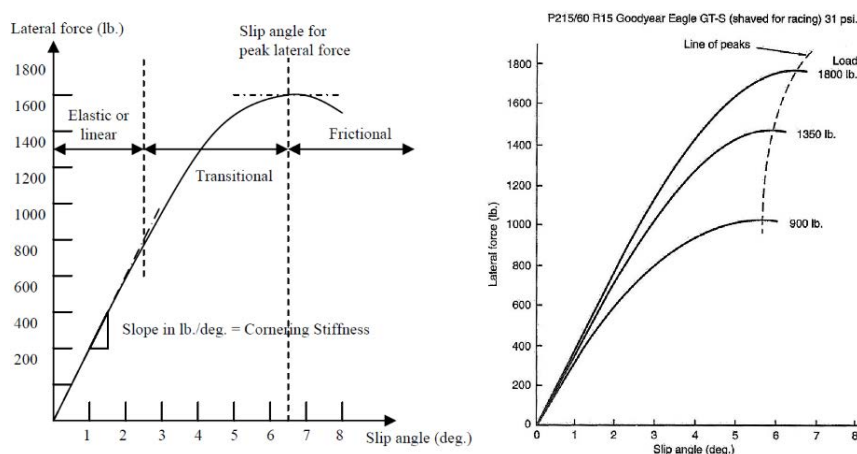


Figura 6.6. Influencia del ángulo de deriva en la fuerza lateral [78].

En un primer tramo, la relación entre fuerza lateral y deriva es aproximadamente lineal. Toda la superficie de la huella mantiene un perfecto contacto con el suelo, y el mecanismo que mantiene la adherencia es por tanto el de adhesión.

Dado que es la zona trasera de la huella la que sufre una mayor flexión, es allí donde se desarrolla la mayor parte de la fuerza lateral. Pero a consecuencia de ello, es la que primero alcanza el límite de adherencia de la goma con el suelo, empezando a deslizarse; es decir, se satura. En estas áreas es la histéresis del neumático la que se hace responsable de mantener un cierto grado de adherencia.

Por otro lado, las áreas más frontales de la huella todavía pueden incrementar su aporte a la fuerza lateral, puesto que aún no han entrado en saturación. En definitiva, la fuerza total continúa creciendo con la deriva, pero a un ritmo cada vez menor. Por último, en la etapa de transición; el paso de la zona lineal a la de transición se produce aproximadamente a la mitad de la deriva de máximo agarre.

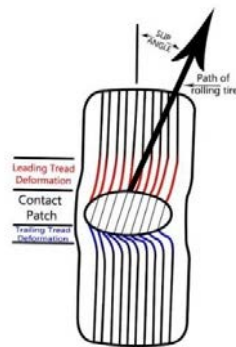


Figura 6.7. Evolución de la huella de contacto [79].

Bajo unas determinadas condiciones, el neumático entra en la etapa de transición, en la que una parte importante de la zona de contacto está en fase de saturación, por lo que el neumático es incapaz de generar más fuerza lateral. A partir de ese punto, la adherencia cae, y pueden producirse situaciones de subviraje, en la que el aumento del ángulo de giro de volante hace que el neumático no siga la dirección deseada. Esto se produce porque se obliga al neumático a trabajar en una zona en la que la adherencia disminuye.

Por último, es importante comentar que tanto las condiciones de trabajo como el tipo de neumático muestran etapas características, y ángulo en el que se pasa de una etapa a otra puede variar en función del mismo.

➤ Ángulo de caída

Lo primero que varía con el ángulo de caída del neumático es la forma de la huella de contacto del mismo sobre el pavimento que, a su vez, genera variaciones en su comportamiento dinámico. En la Figura 6.8 se muestra cómo cambia la forma de la huella de contacto y la distribución de presiones de 3° a 7° de ángulo de caída.

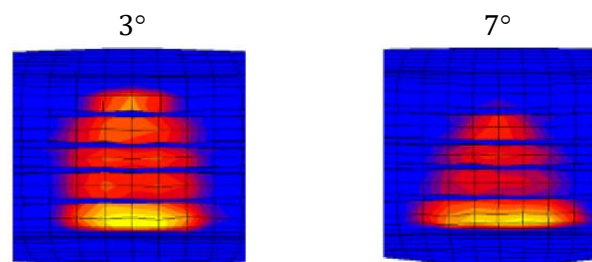


Figura 6.8. Variación de la huella de contacto con el ángulo de caída del neumático [80].

Esta distribución desigual de la fuerza vertical en la huella de contacto tiene una influencia clara sobre la deformación.

Capítulo 7

Análisis de resultados

7.1 Consideraciones previas

En este apartado se analizan los resultados obtenidos experimentalmente tanto en línea recta como en condiciones de paso por curva para cada condición de trabajo del neumático considerada durante los ensayos. A su vez, estas secciones se subdividen en el análisis de los resultados obtenidos en la primera fase experimental y en la segunda.

Con respecto a la primera fase experimental, parte de los resultados obtenidos provienen de los ensayos con los que se inició la línea de investigación en la cual está contenida esta Tesis Doctoral, realizados por el Dr. García-Pozuelo y el Dr. Yang.

Es importante destacar que, aunque en la Figura 5.6 se muestra cómo fueron colocadas las tres rosetas triaxiales, tras la fase de montaje del neumático y los primeros ensayos, dos bandas extensométricas no medían de forma consistente. Además, las medidas realizadas por el resto resultaron equivalentes, por ello, en este capítulo sólo se analizarán los datos obtenidos por tres canales, uno colocado en dirección longitudinal (canal 2 - ε_x) y dos en dirección lateral (canal 1 - ε_{y2} y canal 3 - ε_{y1}).

El objetivo fundamental de la segunda fase experimental es corroborar las conclusiones extraídas de la primera fase realizando ensayos similares con un neumático diferente. La principal diferencia, obviando el equipamiento, está en las condiciones de los ensayos, ya que se incorpora el ángulo de caída como parámetro de influencia en los ensayos. De este modo, se pretende conocer la influencia de este parámetro en la deformación de la banda de rodadura y corroborar los resultados obtenidos en la primera fase experimental, al tiempo que se progresa en la línea de investigación en la que está inmersa esta Tesis Doctoral al introducir nuevas variables.

Los sensores utilizados en la segunda fase experimental, su localización y dirección de medida, así como la numeración empleada en adelante para su análisis, se muestran en la Figura 7.1.

De cara al análisis de resultados es importante tanto la posición de los sensores (en cuanto a si están en la zona sobrecargada o en la descargada) como su posición en la huella de contacto durante el paso por curva. Como se observa en la Figura 7.1, los canales 1, 2 y 3 están situados en la parte exterior de la huella de contacto mientras que los canales 5 y 4 están situados en la interior.

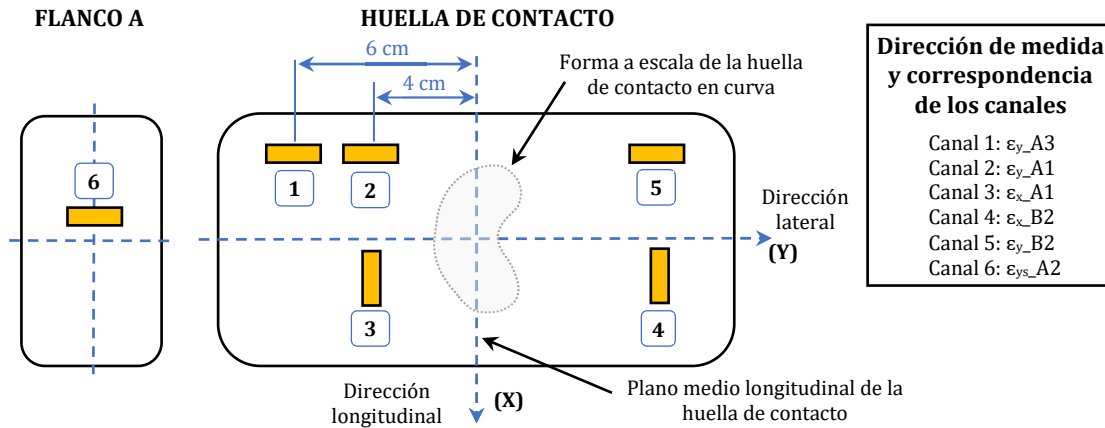


Figura 7.1. Número de canal, localización y dirección de medida de los sensores analizados.

Además, analizando conjuntamente la Figura 7.1 y la Figura 7.2, se puede concluir que los canales 1, 2 y 3 están situados en la parte descargada mientras que los canales 4 y 5 están en la parte cargada, que está sometida a mayor fuerza vertical.

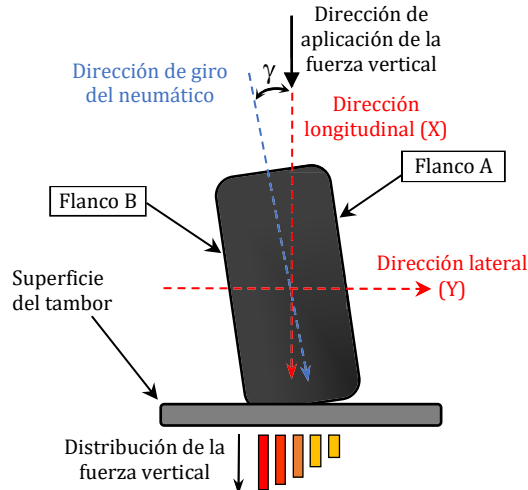


Figura 7.2. Efecto del ángulo de caída en la distribución de la fuerza vertical.

El análisis de la influencia del ángulo de caída junto al ángulo de deriva, la velocidad y la fuerza vertical en los datos de deformación es uno de los objetivos principales. Además, dado que los canales están situados a distancias distintas del plano medio longitudinal, es de interés analizar cuál es la distancia al plano medio longitudinal más idónea para la instalación de sensores para obtener información de cara al desarrollo del neumático inteligente.

Como se muestra en la Figura 7.1, en la parte final de este capítulo se analizarán también los datos recogidos por el sensor situado en el flanco A en condiciones de paso por curva. Este canal mide en dirección longitudinal con respecto a los ejes representados en la Figura 7.2.

Finalmente, cabe destacar que los datos analizados en la segunda fase experimental han sido representados, a diferencia de los de la primera fase experimental, en función del ángulo de rotación del neumático en vez de en función del perímetro del mismo. De este modo, el eje x tendrá un rango de $-180^\circ/180^\circ$, siendo el valor de 0° el correspondiente al punto medio de la huella de contacto a su paso por el tambor de ensayo.

7.1 Condiciones de línea recta

En condiciones de línea recta se considera la influencia de la velocidad de rodadura, la presión de inflado y la fuerza vertical en los datos de deformación. En este apartado, se analiza la influencia de dichas condiciones de trabajo en los distintos canales de medida para ambas fases experimentales.

7.1.1 Influencia de la velocidad

7.1.1.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

Los primeros ensayos realizados se llevaron a cabo variando la velocidad para diferentes fuerzas verticales y presiones de inflado. En la Figura 7.3 se muestran las curvas de deformación para 10, 20 y 30 km/h.

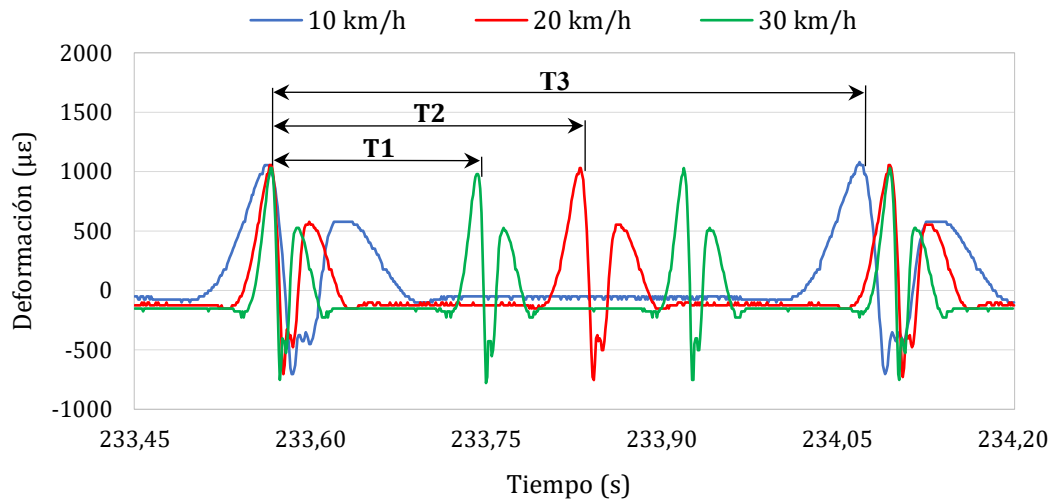


Figura 7.3. Influencia de la velocidad en el período de giro de la rueda.

Se puede observar la influencia de la velocidad en el período de giro de la rueda, tomando como punto de referencia el primer máximo a tracción registrado para cada giro completo de la rueda, que corresponde con la zona de entrada de la banda de rodadura en la huella de contacto. Esto muestra que, como era de esperar, el periodo de rotación de la rueda disminuye cuando la velocidad aumenta. Pero, además, se produce una variación en la distancia entre dos puntos máximos consecutivos por ciclo, es decir, una variación en la longitud del área de contacto. En este caso no se ha realizado un análisis específico de dicha longitud de contacto, ya que se ha elegido otra vía de decisión para estimar las variables analizadas, tal y como se indicará a lo largo del documento. Sin embargo, esta información resulta de gran utilidad y, será analizada en futuros desarrollos.

- **Dirección longitudinal**

En la Figura 7.4, se muestra una comparativa de las curvas de deformación en dirección longitudinal para distintas velocidades.

En general, la variación de la velocidad en dirección longitudinal no tiene una influencia notoria en las curvas de deformación, ya que como se observa en la Figura 7.4, las curvas prácticamente se superponen. Cabe destacar que los valores de deformación a compresión son mayores a la entrada que a la salida de la huella de contacto.

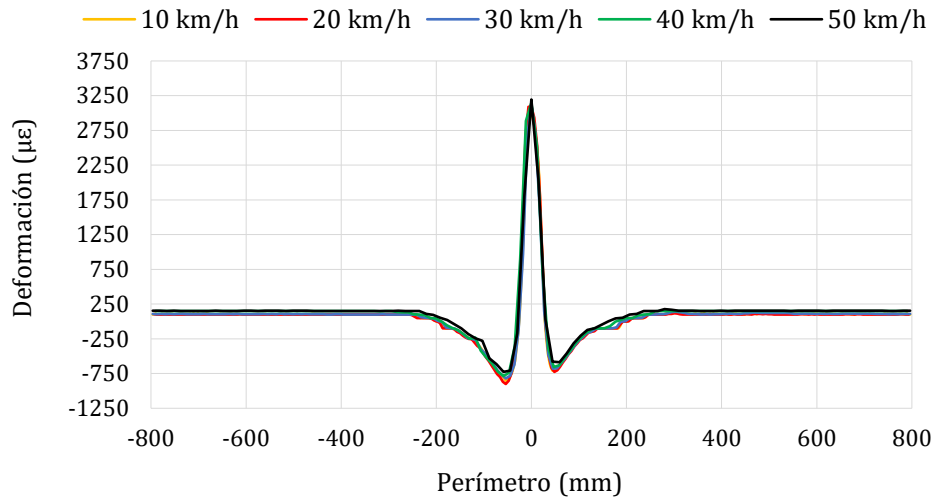


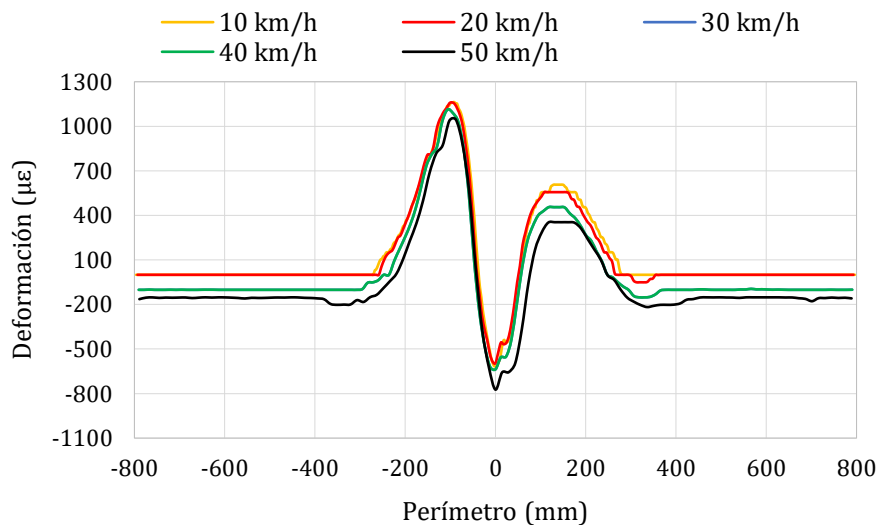
Figura 7.4. Comparación de las curvas a diferentes velocidades en el canal 2 a 1 bar y 750 N.

- **Dirección lateral**

En dirección lateral (ver Figura 7.5), la influencia de la velocidad es notable en todos los puntos característicos de las curvas, sobre todo a la salida de la huella de contacto, donde las diferencias se muestran con más claridad.

Resulta interesante observar cómo la deformación registrada lejos de la huella de contacto (valor denominado *offset*) también guarda una relación clara y directa con la velocidad, algo que no sucede en el caso del canal 2 (ver Figura 7.4). Esto está directamente relacionado con la fuerza centrífuga a la que se somete al neumático para diferentes velocidades. Tomar medidas de deformación lejos de la huella de contacto, cuando los valores son aproximadamente constantes, resulta interesante para la obtención de estimaciones, ya que se puede “desacoplar” la variable velocidad del resto de variables analizadas.

Además, se observa que alrededor del máximo que se produce en el momento de la pisada (valor de máxima compresión Figura 7.5), aparecen fluctuaciones tanto en el canal 1 como en el canal 3, a diferencia del canal 2, donde el pico de máxima tensión se muestra con claridad. Esto podría dificultar la identificación del pico de máxima compresión en los canales dispuestos en dirección lateral.



(a)

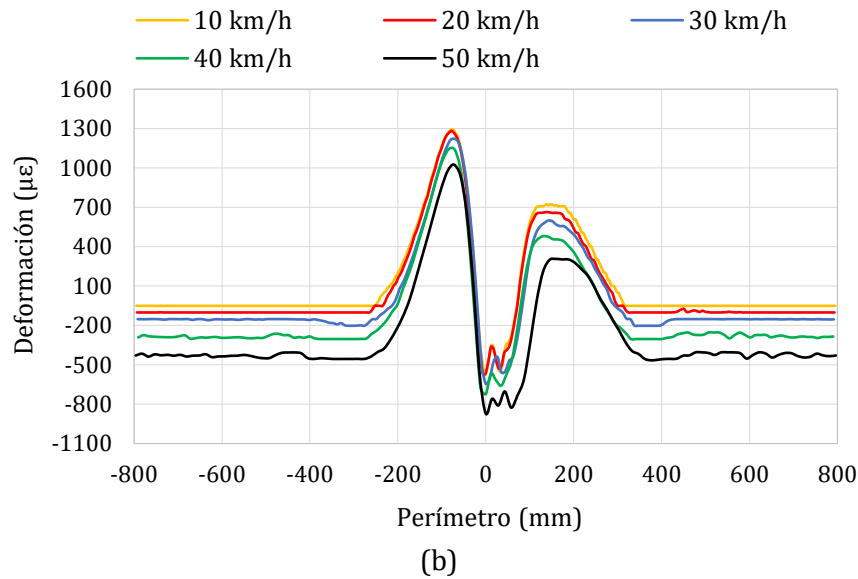


Figura 7.5. Comparación de las curvas a diferentes velocidades en (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1 bar y 750 N.

• Análisis de puntos característicos

El análisis de puntos de máxima deformación resulta de especial interés para conocer qué puntos significativos de las curvas guardan relación con las variaciones de velocidad en términos de tendencia. En la Figura 7.6 se muestra como en los canales dispuestos lateralmente, los picos de máxima tracción, tanto a la salida como a la entrada de la huella de contacto, decrecen notablemente con el aumento de la velocidad, siguiendo una tendencia monótona decreciente en el caso del canal 3. Los valores de compresión se mantienen estables hasta 20 km/h, decreciendo significativamente a partir de esta velocidad, al contrario que en el canal 2.

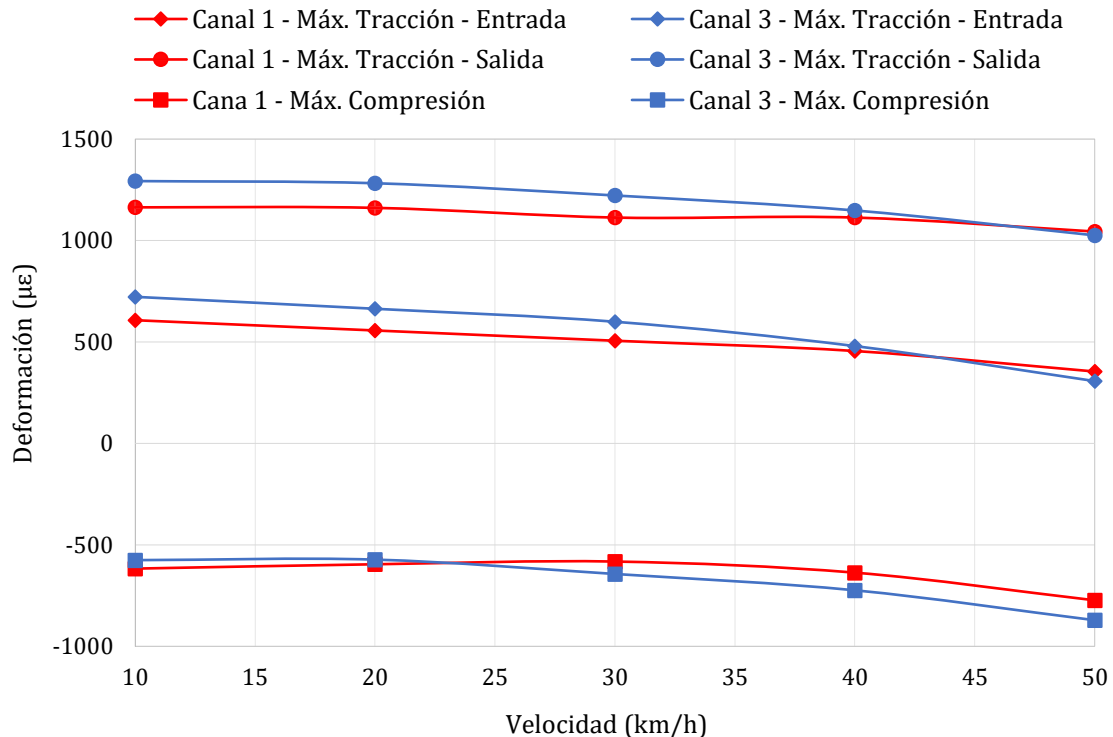


Figura 7.6. Influencia de la velocidad en los valores máximos de deformación en los canales 1 y 3 para 1 bar y 750 N.

7.1.1.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

En cuanto a la influencia de la velocidad, resulta interesante comparar las variaciones obtenidas en los canales 1 y 2, que registran datos de deformación en dirección lateral. Como se observa en la Figura 7.7, tanto el canal 1, situado en una zona más alejada del plano medio longitudinal y, por tanto, más cerca del flanco del neumático, como el canal 2, muestran variaciones significativas en los puntos más representativos. Si se observa el valor del *offset*, se puede decir que el canal 1 muestra mayor diferencia entre 10 y 30 km/h que el canal 2. Esto puede ser debido a que los flancos y los hombros del neumático son partes mucho más flexibles que la parte central de la banda de rodadura, que es con diferencia la parte más protegida del neumático. Como consecuencia, cuanto más cerca está el sensor del flanco, mayor es la deformación obtenida, tanto a su paso por la huella de contacto (0°) como en la zona más alejada de la misma.

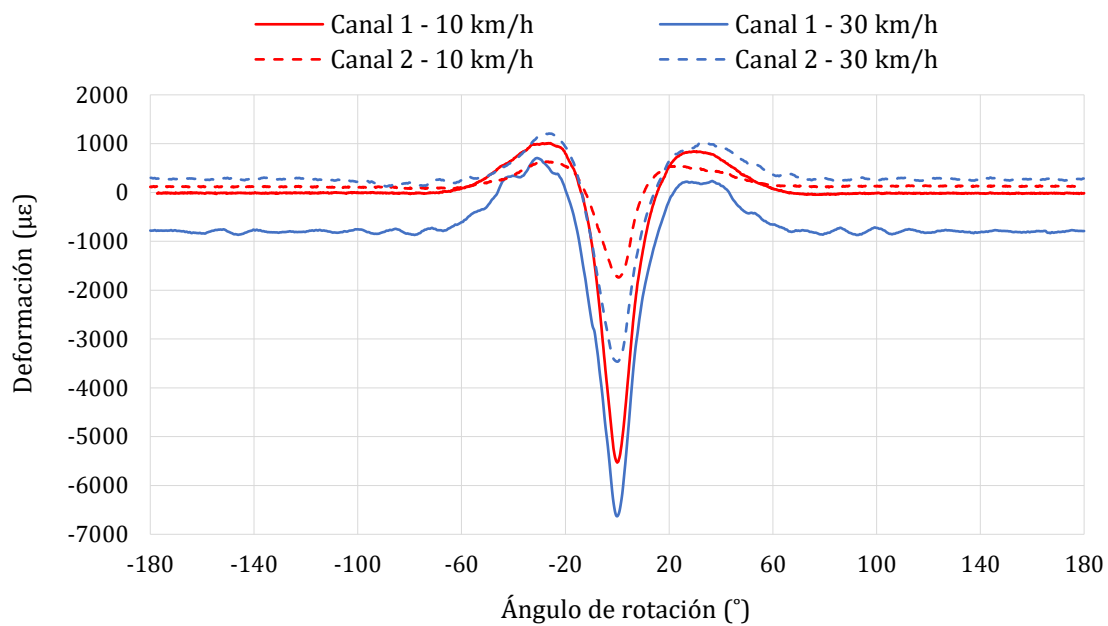


Figura 7.7. Influencia de la velocidad en los canales 1 y 2 a 250 N.

Si además se tiene en cuenta que el canal 1 está situado en una zona menos cargada que el canal 2, se puede concluir que la flexibilidad del área donde está situado el canal 1 contrarresta con creces el efecto de la distribución desigual de la fuerza vertical (debida al ángulo de caída), ya que la deformación obtenida en canal 1 a su paso por la huella de contacto es prácticamente el doble que en el canal 2.

En cuanto a la influencia de la velocidad, ésta afecta también en mayor medida al canal 1, disminuyendo la deformación a tracción a la entrada y salida de la huella de contacto y aumentando la compresión en el centro de la huella. En el caso del canal 2, la tendencia es diferente en el caso de la deformación a la entrada y a la salida de la huella, mientras que en el punto de contacto es mayor la deformación para 30 km/h que para 10 km/h.

- **Análisis de puntos característicos**

Al igual que en la primera fase experimental, en esta sección se estudia el comportamiento de los picos máximos de deformación para evaluar posteriormente su potencial para la estimación de parámetros.

En la Figura 7.8, se observa la influencia de la velocidad en los picos máximos de deformación del canal 1 para una fuerza vertical de 250 N.

En general, tanto los picos máximos de deformación a tracción como el pico máximo a compresión tienen una tendencia monótona, disminuyendo con el aumento de la misma, aunque el pico de compresión decrece en mayor medida de 20 a 30 km/h.

El canal 2 tiene un comportamiento totalmente diferente, la deformación a tracción y a compresión aumenta para 30 km/h, siendo la tendencia de éste último caso de tipo parabólico.

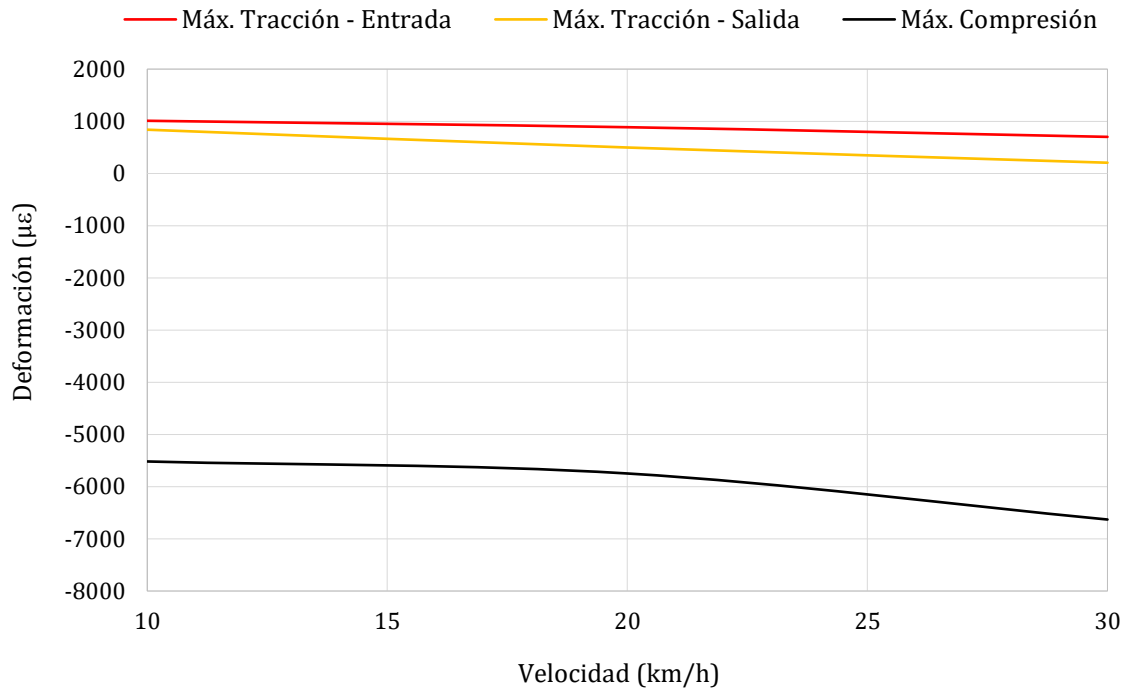


Figura 7.8. Influencia de la velocidad en los picos máximos de deformación en el canal 1 a 250 N.

7.1.2 Influencia de la presión

7.1.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

Como se ha comentado anteriormente, la presión de inflado tiene múltiples efectos en la deformación de la banda de rodadura, no sólo en la influencia que tiene sobre la rigidez del neumático, sino también por cómo afecta a la huella de contacto.

- **Dirección longitudinal**

En dirección longitudinal se aprecian diferencias notables en los puntos de máxima compresión a la entrada y salida de la huella de contacto, como se observa en la Figura 7.9. Sin embargo, no se aprecian diferencias claras ni en el punto de máxima tracción ni en los valores del *offset*.

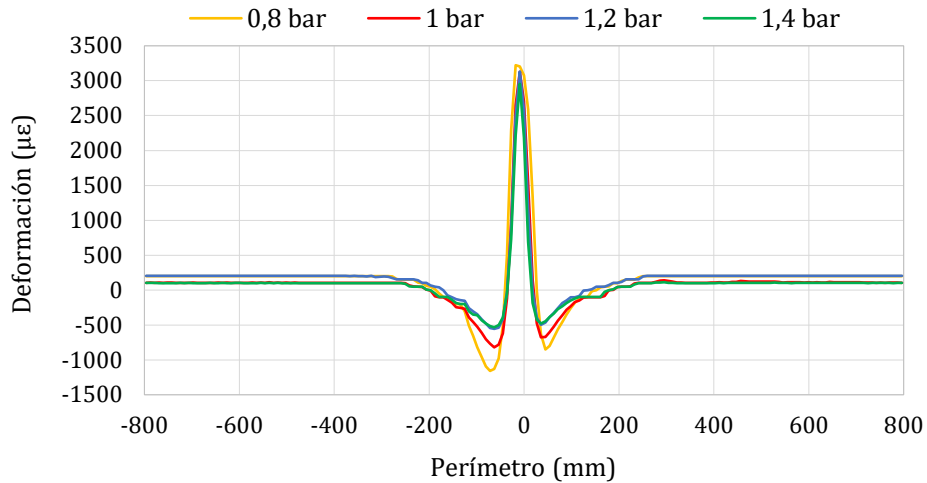
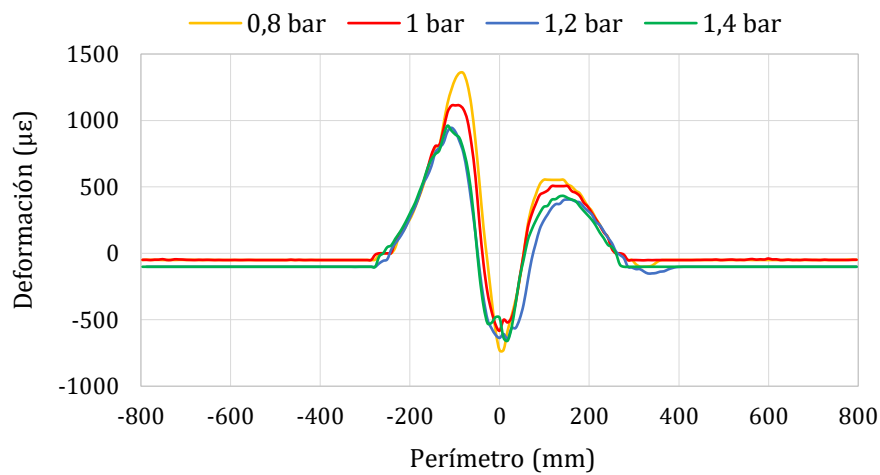


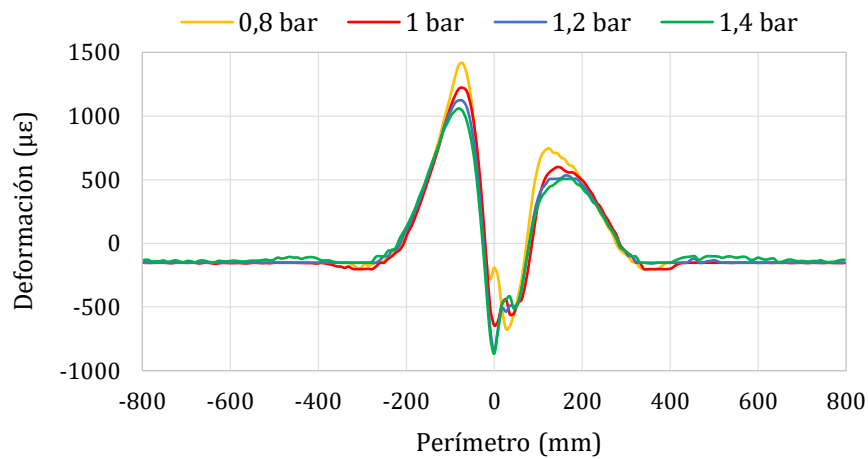
Figura 7.9. Comparación de las curvas a diferentes presiones en el canal 2 a 30 km/h y 750 N.

- **Dirección lateral**

La variación de la presión influye en los puntos de máxima tensión a la entrada y salida de la huella de contacto para ambos canales. Las diferencias más claras se encuentran en el canal 3 en la entrada de la huella de contacto (ver Figura 7.10 (b)), ya que en el canal 2 las curvas para 1,2 y 1,4 bar se superponen (ver Figura 7.10 (a)).



(a)



(b)

Figura 7.10. Comparación de las curvas a diferentes presiones en (a) canal 1 y (b) canal 3 a 30 km/h y 750 N.

Alrededor del punto de contacto se aprecian fluctuaciones que impiden observar a simple vista si existe una relación lógica entre la presión y la deformación del neumático en ese punto. Asimismo, cabe destacar que en ninguna de las dos direcciones de medida se observan variaciones significativas del *offset*.

- **Análisis de puntos característicos**

En dirección longitudinal (ver Figura 7.11) la deformación sigue una tendencia decreciente en los puntos de máxima compresión a la entrada y salida de la huella de contacto, sin embargo, la máxima deformación a compresión alcanza su máximo aproximadamente a 1 bar.

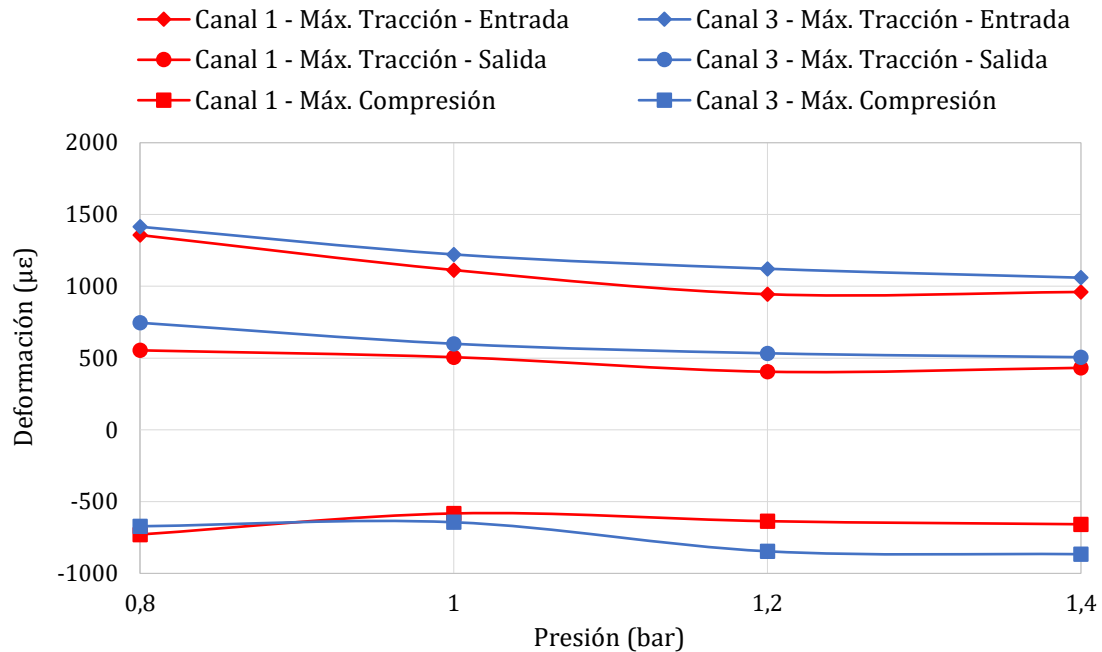


Figura 7.11. Influencia de la presión en los valores máximos de deformación en los canales 1 y 3 para 30 km/h y 750 N.

7.1.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

Los ensayos realizados con variaciones de presión mostraron resultados similares a los obtenidos en la primera fase experimental, donde la relación entre la deformación y las variaciones de presión no fueron lo suficientemente claras como para poder establecer patrones de comportamiento, por lo que no se han representado en este apartado. Las conclusiones obtenidas en la segunda fase experimental son equivalentes a las obtenidas anteriormente. Esto ha llevado a no utilizar las bandas extensométricas para caracterizar presiones.

7.1.3 Influencia de la fuerza vertical

7.1.3.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

En condiciones de línea recta, la fuerza vertical es el factor más influyente en la deformación del neumático, y afecta de forma significativa a todos los puntos característicos de las curvas obtenidas; el aumento de la fuerza vertical aumenta la deformación del neumático, sometiéndolo a procesos de tracción y compresión más severos.

- **Dirección longitudinal**

En dirección longitudinal, el aumento de la fuerza vertical provoca que los valores de deformación a tracción y compresión en los picos máximos aumenten, o lo que es lo mismo, la amplitud de las curvas, entendido como la diferencia entre el pico de máxima tracción y el pico de máxima compresión, aumente, como se observa en la Figura 7.12.

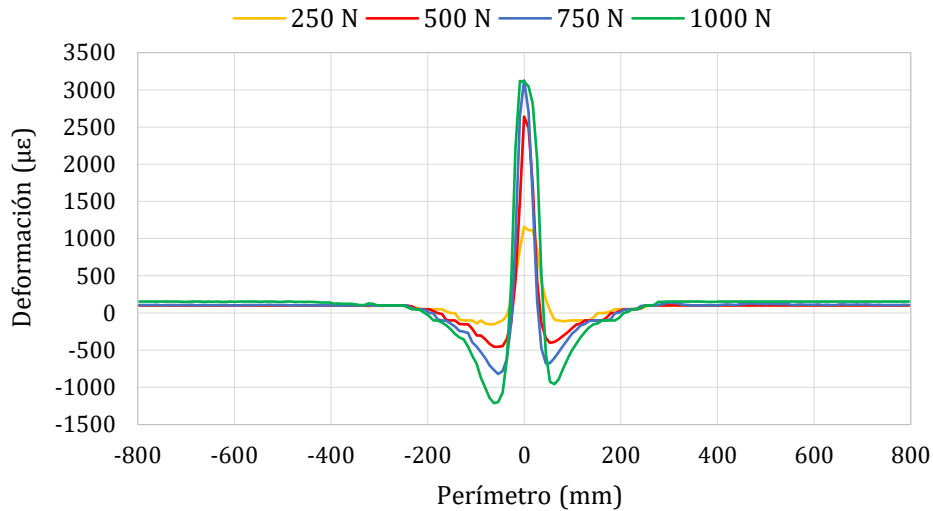
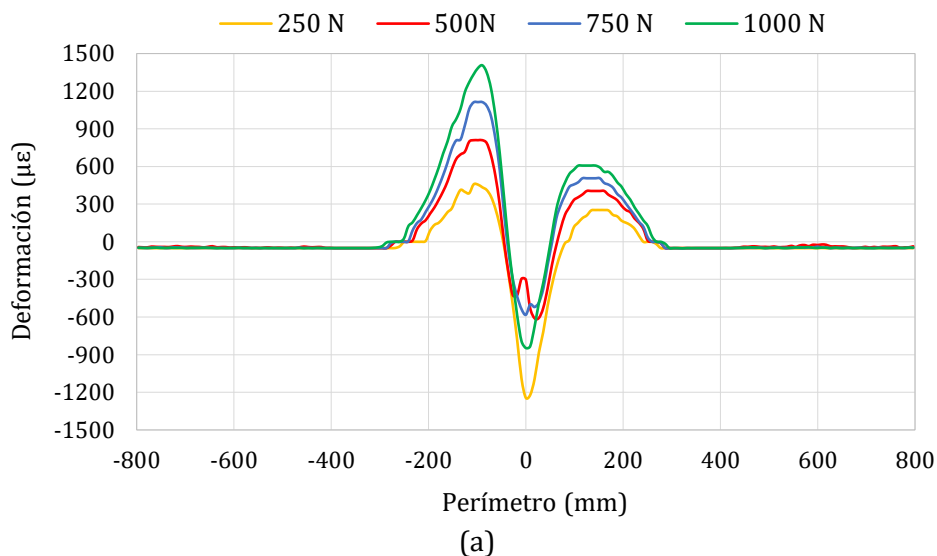


Figura 7.12. Comparación de las curvas a diferentes fuerzas verticales en el canal 2 a 1 bar y 30 km/h.

Los datos obtenidos confirman que el aumento de la fuerza vertical provoca un aumento en la deformación de la carcasa, tal y como cabía prever. Para fuerzas verticales elevadas, dentro del área de contacto del neumático, en torno al centro de la huella (0 mm), se observan variaciones poco significativas en comparación con las que se producen para 250 y 500 N.

- **Dirección lateral**

El aumento de la fuerza vertical provoca que los valores máximos de deformación a tracción a la entrada y salida de la huella de contacto también aumenten. Sin embargo, esta relación no se mantiene alrededor del punto de contacto, donde además de algunas fluctuaciones, se observa que se obtienen mayores deformaciones a compresión a 250 N que a cualquier otra, como se observa en la Figura 7.13 (a) y (b).



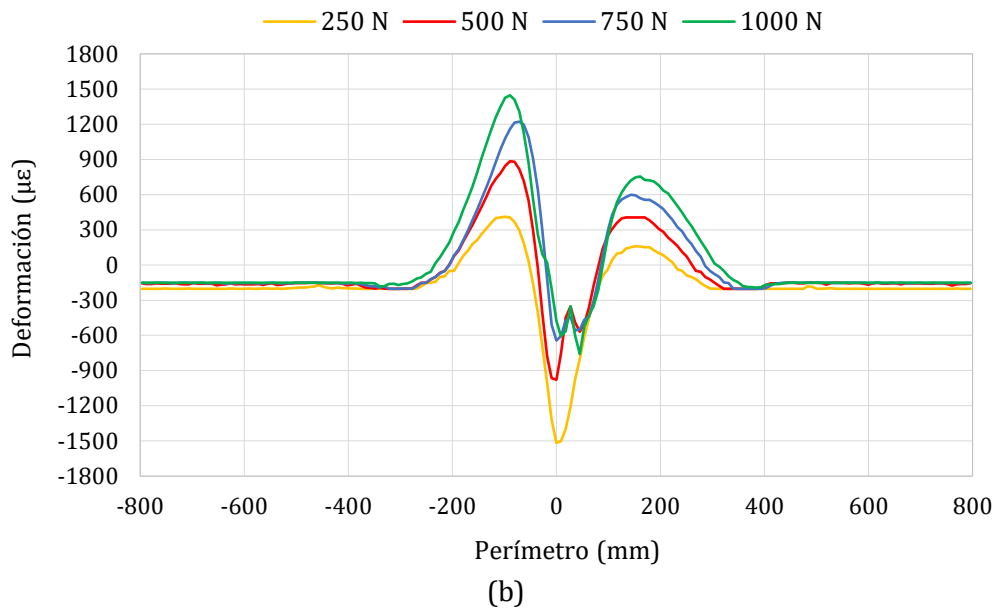
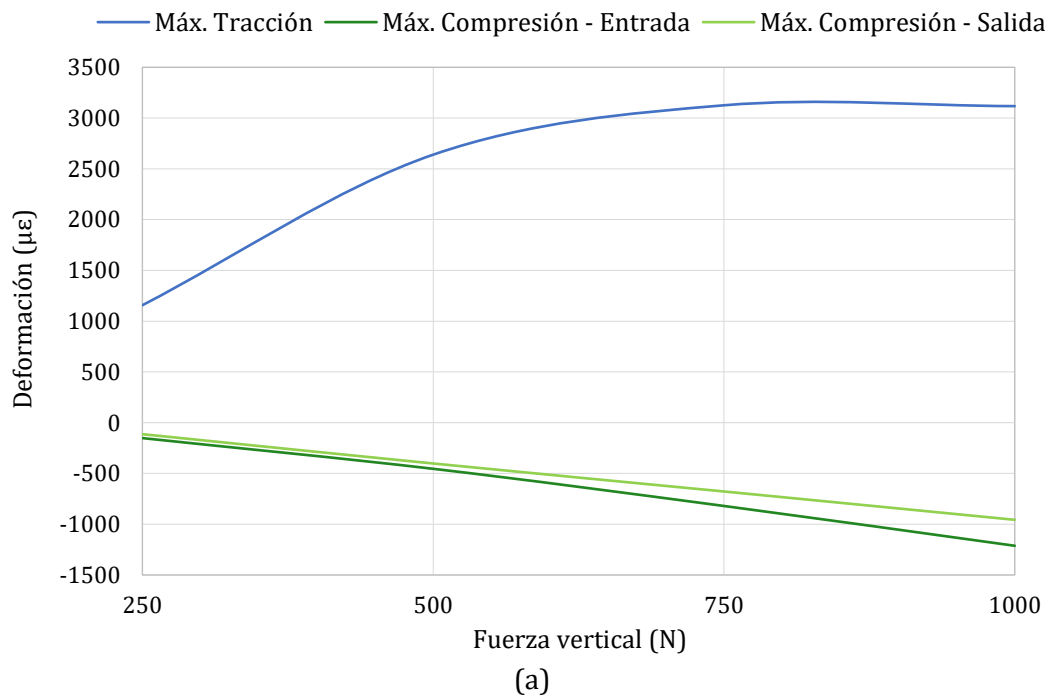


Figura 7.13. Comparación de las curvas a diferentes presiones en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1 bar y 30 km/h.

• Análisis de puntos característicos

El análisis de los puntos de máxima deformación esclarece las conclusiones mencionadas anteriormente; en dirección longitudinal, la deformación a compresión a la entrada y salida de la huella de contacto siguen una relación aproximadamente lineal con el aumento de la fuerza vertical, como se muestra en la Figura 7.14 (a). Por el contrario, en dirección lateral, Figura 7.14 (b), son los picos máximos de deformación a tracción a la entrada y salida de la huella de contacto los que guardan una relación más lineal con la variación de la fuerza vertical.



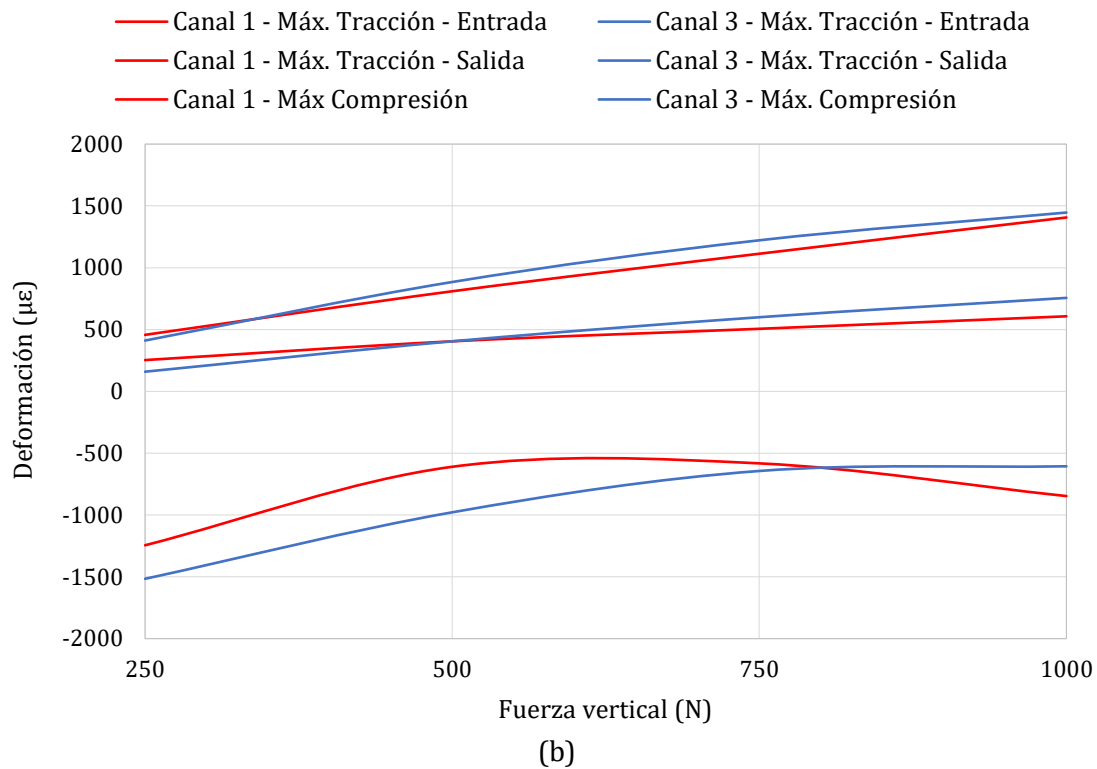


Figura 7.14. Influencia de la fuerza vertical en los valores máximos de deformación en el (a) canal 2 y (b) canales 1 y 3 a 1 bar y 30 km/h.

Con el objetivo de diseñar un neumático inteligente, es especialmente interesante seleccionar aquellos valores de deformación que muestren un comportamiento más claro y preciso al variar los parámetros analizados. Por este motivo, para medir los cambios en la fuerza vertical de un modo más claro y sencillo de procesar, se recomienda colocar los sensores dispuestos lateralmente para trabajar con relaciones aproximadamente lineales.

7.1.3.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

La variación de la fuerza vertical, como factor más influyente en la deformación de la banda de rodadura, muestra las mayores diferencias en las curvas de deformación. En este caso, se analizan los resultados de los canales 3 y 4, como se observa en la Figura 7.15. Estos canales están situados a distancias diferentes del plano medio longitudinal y en lados opuestos.

El canal 4 registra una deformación a tracción muy superior a la del canal 3. Esto es debido, de nuevo, a que el canal 4 está situado en una zona más flexible y cargada que el canal 3. Como resultado, la deformación máxima obtenida en el canal 4 prácticamente cuadruplica la del canal 3, como se observa en la Figura 7.15.

La fuerza vertical influye de forma clara a los tres picos de deformación de la curva, mientras que el *offset* no varía considerablemente. De modo general, el aumento de la fuerza vertical produce mayor deformación a compresión a la entrada y salida de la huella de contacto, mientras que en el momento del impacto (alrededor de 0°), las diferencias son aún mayores. En los tres casos, la tendencia de la deformación con el aumento de la fuerza vertical es monótona creciente.

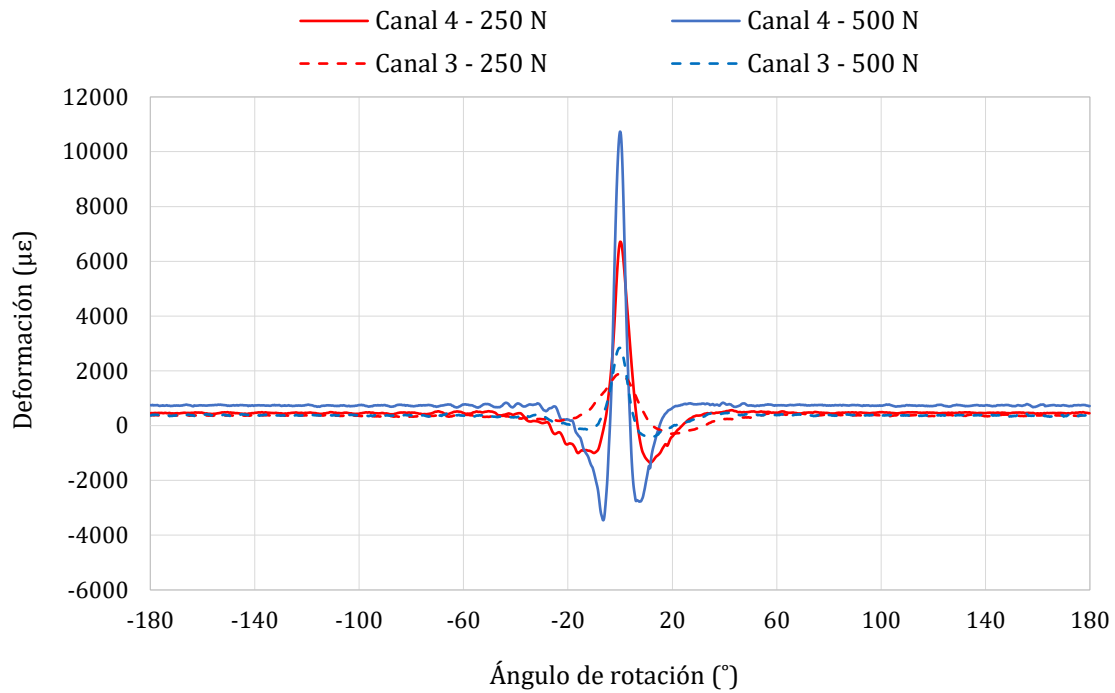


Figura 7.15. Influencia de la fuerza vertical en los canales 3 y 4 a 30 km/h.

• Análisis de puntos característicos

La fuerza vertical tiene una influencia capital en el valor de la deformación en el momento de la pisada, sea cual sea la dirección de medida. En la Figura 7.16, se muestra cómo el pico de deformación a tracción en el canal 3 aumenta a partir de 500 N. Sin embargo, la deformación a compresión disminuye con el aumento de la fuerza vertical, aunque entre 750 y 1000 N no se muestran grandes diferencias.

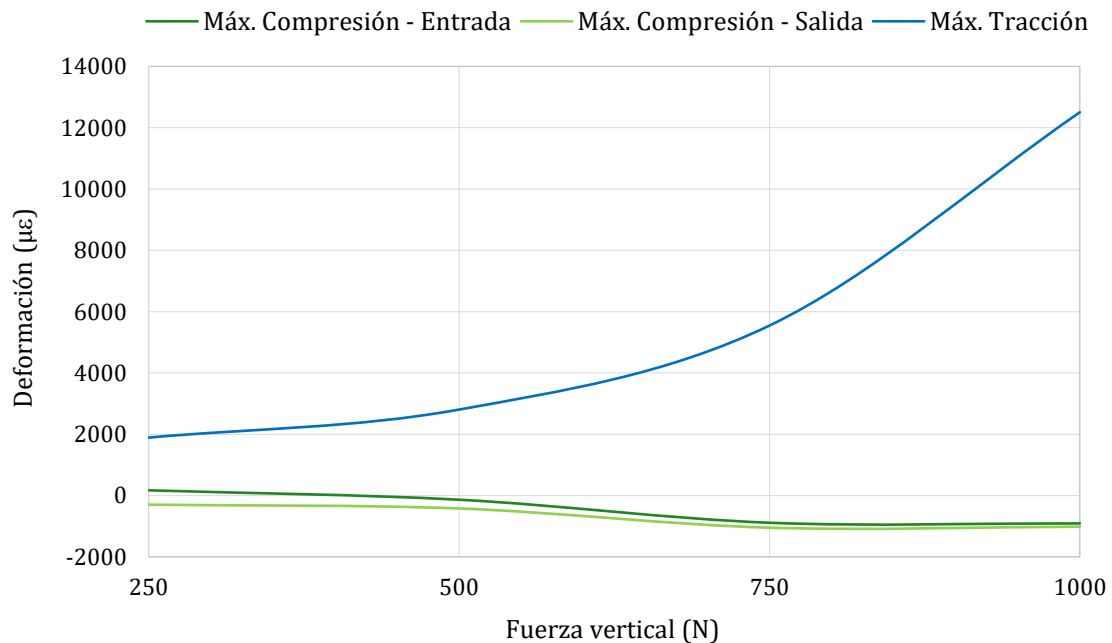


Figura 7.16. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 3 a 30 km/h.

En contraposición, el canal 4 muestra un comportamiento muy diferente en cuanto al pico de máxima deformación a tracción, ya que aumenta de 250 N a 500 N, pero se

mantiene estable (incluso decrece ligeramente) entre 500 N y 1000 N. Por otro lado, la deformación a compresión disminuye, al igual que en el canal 3, de forma progresiva en todas sus etapas de fuerza vertical.

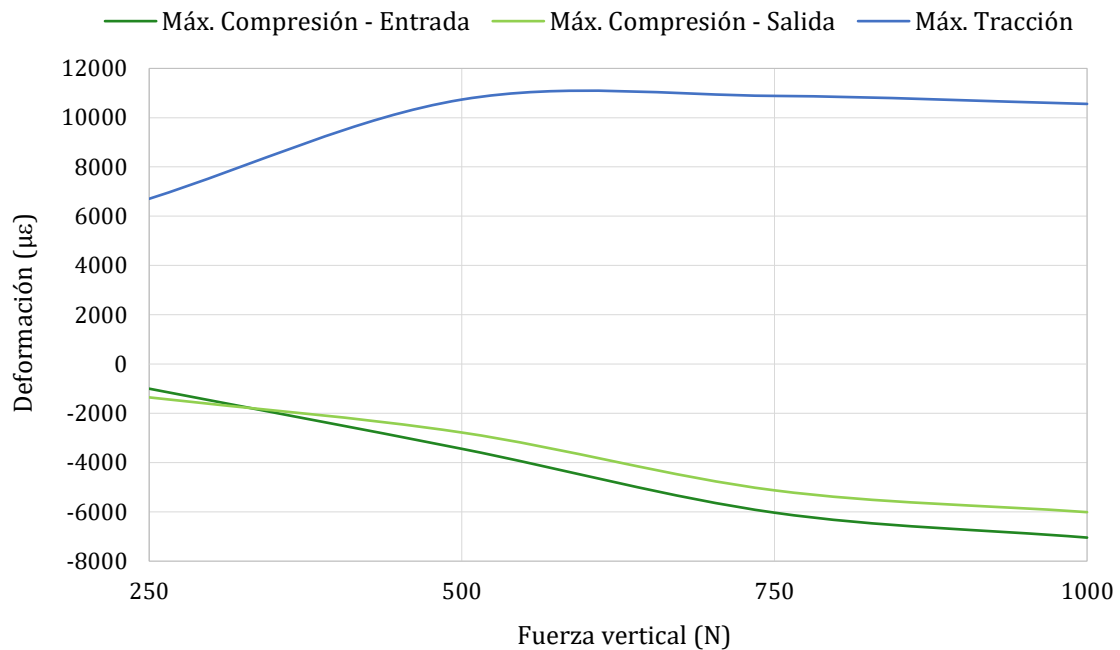


Figura 7.17. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 4 a 30 km/h.

El *offset*, sin embargo, tiene un comportamiento muy similar en ambos canales. Como se muestra en la Figura 7.18, el *offset* tiene dos fases de crecimiento, de 250 N a 500 N y de 750 N a 1000 N, sin embargo, de 500 N a 750 N la deformación a tracción llega incluso a disminuir, por lo que el potencial de este punto para la obtención de información se ve claramente perjudicado por el cambio de tendencia.

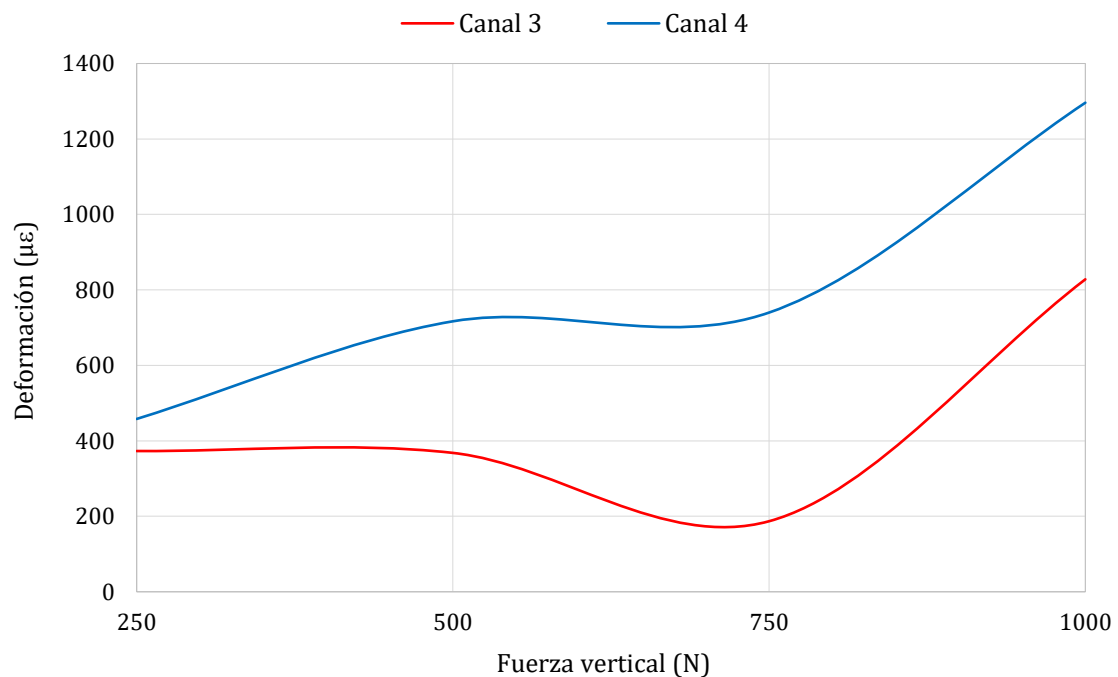


Figura 7.18. Influencia de la fuerza vertical en el valor del offset en los canales 3 y 4 a 30 km/h.

7.2 Condiciones de paso por curva

Con el objetivo de ampliar el análisis realizado para rodadura en línea recta (con ángulo de deriva igual a cero) se estudia el conjunto de datos obtenidos en condiciones de circulación en curva para analizar la influencia de los parámetros controlados durante los ensayos de ambas fases experimentales.

Del mismo modo que en el anterior apartado, se han analizado los puntos máximos de deformación para buscar relaciones entre las condiciones de trabajo del neumático y la tendencia de los mismos con el objetivo de proporcionar información que permita identificar parámetros de funcionamiento como la fuerza vertical, la velocidad angular, etc. Estas relaciones entre la deformación del neumático y las condiciones de trabajo tienen un papel importante en la estimación del comportamiento dinámico del neumático y otras características [81].

Al igual que se mostró en la Figura 7.1 la importancia de la posición de los sensores en el paso por curva durante los ensayos realizados en la segunda fase experimental, en la primera fase este hecho también tiene gran importancia. A diferencia de los ensayos en línea recta donde la forma de la huella de contacto se presupone más o menos simétrica con respecto al plano medio longitudinal, en curva la deformación del neumático y, por tanto, la forma de la huella de contacto, no es simétrica.

Por ello, es importante destacar que, como se muestra en la Figura 7.19, en la primera fase experimental los canales 2 y 3 están situados en la parte exterior de la huella de contacto (más cerca del lado convexo), mientras que el canal 1 se encuentra situado en la parte interior (más cerca del lado cóncavo).

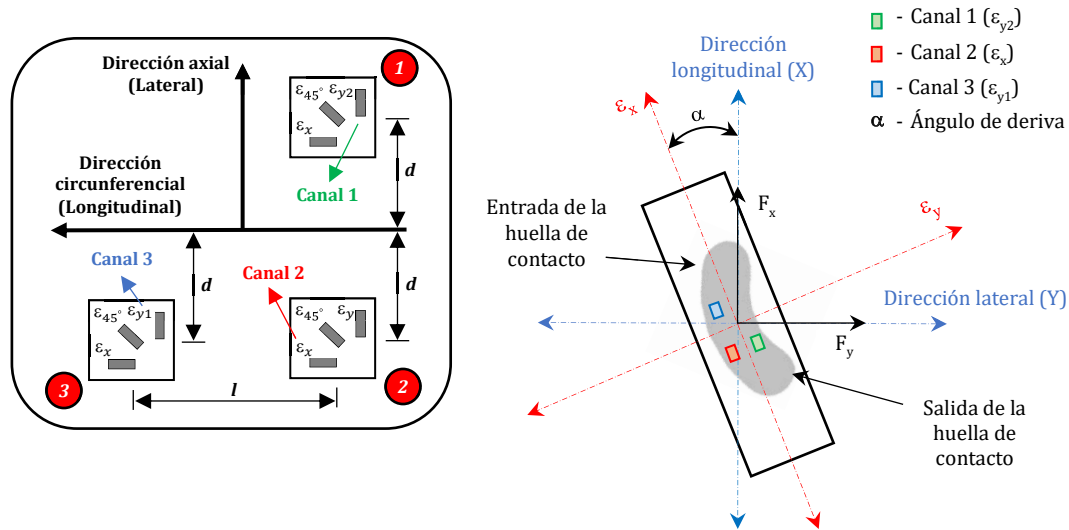


Figura 7.19. Disposición de los sensores en la huella de contacto en condiciones de paso por curva.

Este detalle es fundamental, puesto que, durante el paso por una curva, la distribución de presiones y fuerzas en el contacto neumático-calzada varía en función de las condiciones de trabajo, lo que se traduce en una deformación cambiante del neumático a ambos lados del plano medio longitudinal. Por tanto, los valores de deformación obtenidos por los canales 1 y 3 pueden variar significativamente debido a este hecho.

En el paso por curva, los neumáticos se deforman en dirección longitudinal y lateral, provocando cambios sustanciales en la forma de la huella de contacto para dirigir el vehículo a lo largo del camino deseado. De este modo, algunos sensores pasan por la parte exterior de la huella de contacto y otros por la interior, como se mostró en la Figura 7.1. En el caso de los canales analizados, los canales 1, 2 y 3 están en la parte exterior que, además, es la zona menos cargada debido al ángulo de caída, mientras que el 4 y el 5 están en la parte interior, que soporta la mayor parte de la fuerza vertical aplicada. Estos factores son muy influyentes en el comportamiento de las curvas de deformación, como se mostrará en sucesivos apartados.

7.2.1 Influencia del ángulo de deriva

7.2.1.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

El ángulo de deriva, como parámetro básico para establecer si un neumático está trabajando en condiciones de línea recta o paso por curva, tiene una importancia fundamental. En este apartado se analiza su influencia tanto en los valores de deformación medidos en dirección longitudinal como transversal.

- **Dirección longitudinal**

Con el objetivo de mostrar con mayor claridad la posible influencia del ángulo de deriva en las curvas de deformación, en las sucesivas figuras se acota el análisis del perímetro únicamente a los puntos cercanos a la huella de contacto (el perímetro total del neumático es aproximadamente 1592 mm). En la Figura 7.20 se presentan las curvas para el intervalo (-200, 200) mm.

Los valores pico de deformación aumentan gradualmente cuando el ángulo de deriva aumenta desde 2° hasta 10°. Sin embargo, en 13° y 14° los valores de deformación decrecen drásticamente, incluso por debajo de la deformación a 0°. Además, conforme aumenta el ángulo de deriva se observa que la forma de la curva es progresivamente menos pronunciada. Es decir, la curva es cada vez más “plana” en torno al centro de la huella de contacto, destacando menos el valor máximo registrado. Cuantificando esta variación, para un ángulo de deriva de 13° el valor máximo del pico de tracción disminuye casi un 32%, y en 14° un 34%, en comparación con el mismo pico a 0°.

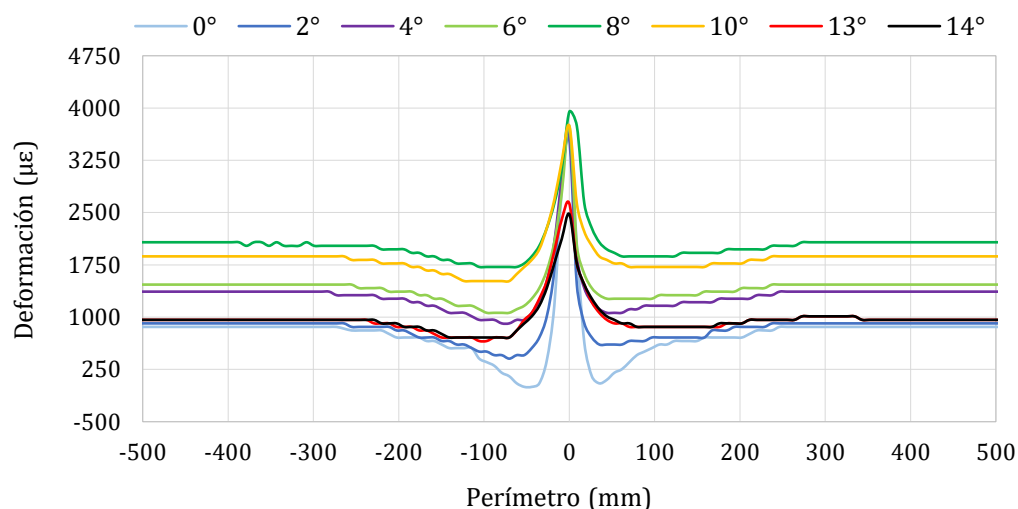


Figura 7.20. Influencia del ángulo de deriva en el canal 2 para 1,2 bar, 750 N y 30 km/h.

De forma complementaria a la información obtenida a partir del análisis del valor en el pico de máxima deformación a tracción, también se obtuvieron resultados interesantes cuando el sensor de deformación registraba datos lejos del centro de la huella de contacto. Por ejemplo, a -150 mm, se observa que el valor del desplazamiento cambia dependiendo de las condiciones de funcionamiento. En particular, se observa que el valor del *offset* crece cuando el ángulo de deriva también lo hace. Sin embargo, nótese que los valores de *offset* en 13° y 14° tienden a disminuir de un modo semejante a como ocurre con el pico de máxima deformación.

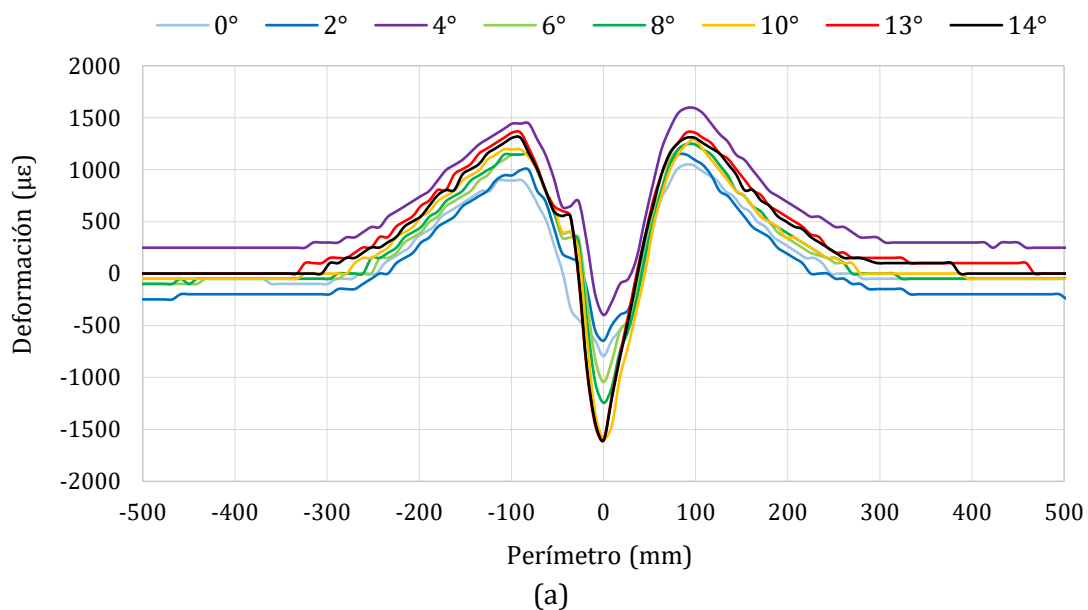
- **Dirección lateral**

En dirección lateral las variaciones en los datos de deformación lateral en función del ángulo de deriva son significativas, como se puede apreciar en la Figura 7.21. En esta figura se muestran datos de deformación en el intervalo (-500, 500) mm para todo el perímetro del neumático (aproximadamente 2/3 de la longitud total del perímetro).

Igual que en las curvas de dirección longitudinal, el valor del *offset* varía claramente con el ángulo de deriva.

En cuanto a los valores máximos y mínimos de deformación, éstos cambian ligeramente para los valores de deformación a tracción registrados a la entrada y a la salida de la zona de contacto. Hasta 8° la tracción aumenta a medida que aumenta el ángulo de deriva. Sin embargo, para 10°, el primer máximo de deformación, registrado al inicio de la huella de contacto, es menor que el segundo, registrado al final de la zona de contacto. No obstante, el cambio más significativo en las curvas de deformación se produce para los valores de pico a compresión. Se observa un aumento progresivo en valor absoluto hasta 10°, para luego caer drásticamente a 13° y 14°.

Por último, cabe destacar que el hecho de que en la Figura 7.21 (b) la deformación máxima a compresión obtenida a 0° sea menor que para otros valores del ángulo de deriva es algo que no se produce para todos los casos. Aunque se podría realizar un análisis en profundidad de los máximos en este punto, teniendo en cuenta que los resultados no varían significativamente con las condiciones de trabajo, este punto no se ha considerado de interés y no será analizado en profundidad.



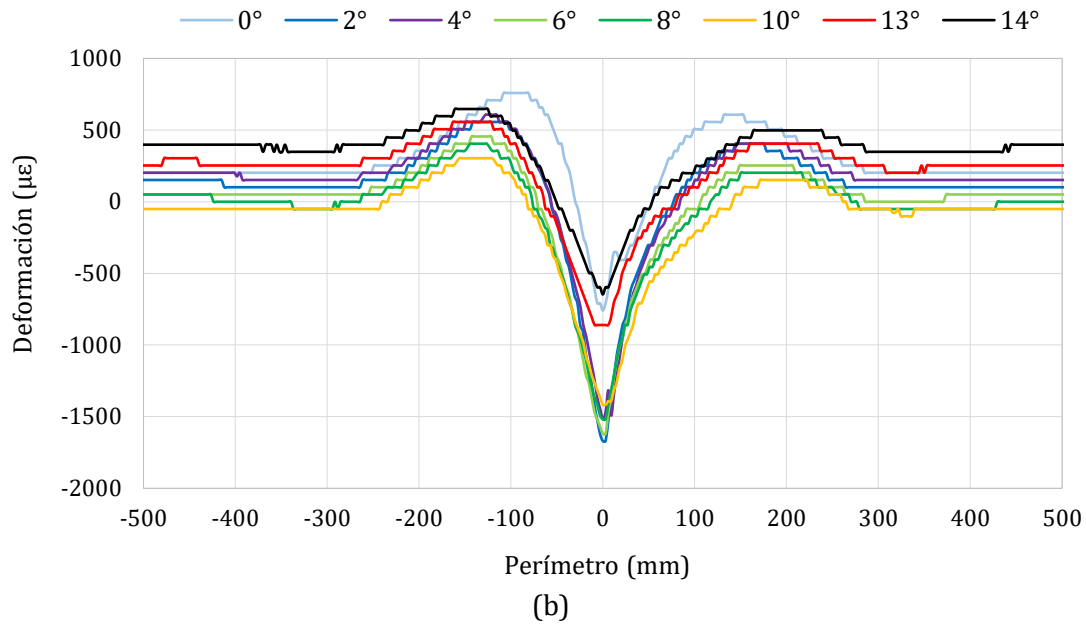


Figura 7.21. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1,2 bar, 750 N y 30 km/h.

7.2.1.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

El ángulo de deriva es el parámetro diferencial en el paso por curva. Como se observa en la Figura 7.22, los canales 1 y 5, situados simétricamente respecto del plano medio longitudinal en dirección lateral, muestran comportamientos muy diferentes.

El canal 5, situado en la parte interior de la huella de contacto, muestra mayores diferencias a la entrada y salida de la huella de contacto que el canal 1, pero el comportamiento de los picos máximos de deformación a tracción es muy similar. El comportamiento del punto máximo de deformación en el centro de la huella de contacto es el más interesante. Normalmente, los canales que miden en dirección lateral registran un pico máximo de compresión, sin embargo, los canales situados en la parte interior de la huella de contacto durante el paso por curva y que miden en dirección lateral muestran un pico máximo de deformación a tracción en vez de a compresión cuando el ángulo de deriva es distinto de 0° y la fuerza vertical es baja, como se muestra en la Figura 7.22 (b). Este hecho, que tiene una gran importancia para evaluar el potencial de los canales que muestran este fenómeno, se estudiará con mayor detenimiento en apartados posteriores.

Con respecto a la influencia del ángulo de deriva, se puede observar que la tendencia de los picos máximos de deformación no es lineal. En particular, los puntos máximos de deformación a la entrada y salida de la huella de contacto decrecen (disminuye la deformación a tracción) con el aumento del ángulo de deriva a partir de 2° , pero vuelve a aumentar a partir de 6° (ver Figura 7.22 (a)). En el caso del canal 5, la deformación máxima a tracción decrece a partir de 0° en estos puntos. Por último, la variación del *offset* es ligera en comparación con la deformación medida en los puntos característicos de las curvas.

El ángulo de caída tiene una influencia crucial en los valores máximos de deformación, sobre todo en los picos máximos de deformación a compresión (o a tracción, en el caso de la Figura 7.22 (b)). En los puntos máximos de deformación a tracción a la entrada y salida de la huella de contacto, el ángulo de caída provoca que las deformaciones registradas en estos dos picos sean mayores en el canal 5, al estar soportando fuerzas verticales diferentes.

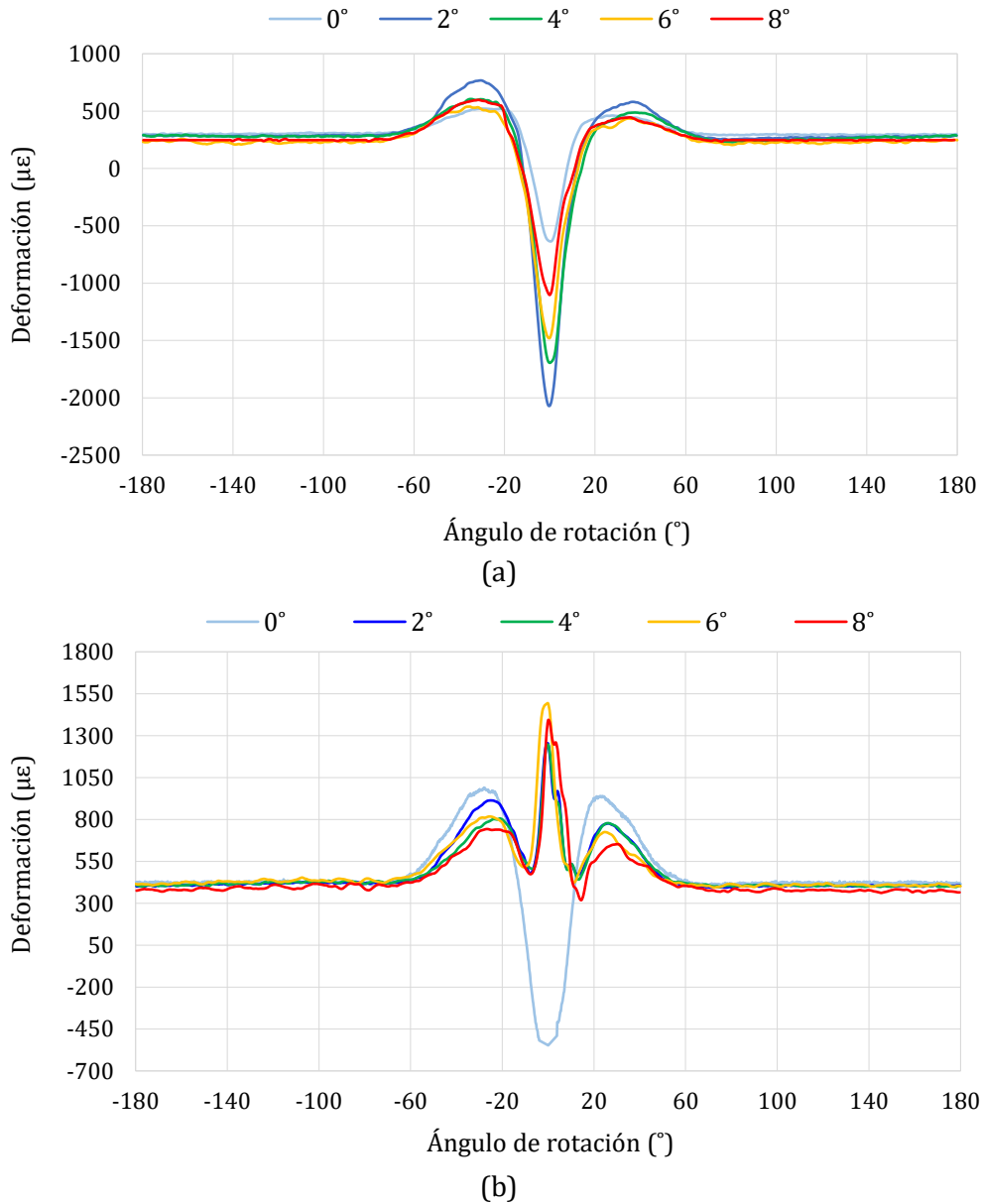


Figura 7.22. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 1 y (b) canal 5 a 250 N y 10 km/h.

En la Figura 7.23, se representa la influencia del ángulo de deriva con el ángulo de caída en dirección longitudinal.

La deriva del neumático afecta ligeramente al valor del *offset* (ver Figura 7.23 (a)), mientras que los cambios en los picos máximos de deformación a tracción y compresión son notables (ver Figura 7.23 (b)). Aunque la variación de los picos de deformación no es lineal, se deduce que el incremento del ángulo de deriva provoca el decremento de la deformación, es decir, la amplitud de las curvas (diferencia entre el pico máximo de deformación a tracción y a compresión) disminuye.

Por otro lado, la variación del ángulo de caída no implica una variación tan sustancial como la que provoca la variación del ángulo de deriva en los puntos mencionados anteriormente. Es significativo que la señal del canal 4 sea mucho más estable que la del canal 3, situado en la parte exterior de la huella de contacto, en el lado menos cargado (el cual no está apoyado completamente sobre del tambor, como se muestra en la Figura 5.37). Este hecho podría tener una importancia clave a la hora de adquirir información en tiempo

real, de cara a la identificación de los picos máximos de deformación a tracción o compresión. Finalmente, se observa en la Figura 7.23 (b) que la variación del ángulo de deriva afecta en mayor medida al pico de deformación a compresión a la entrada de la huella de contacto que a los otros dos.

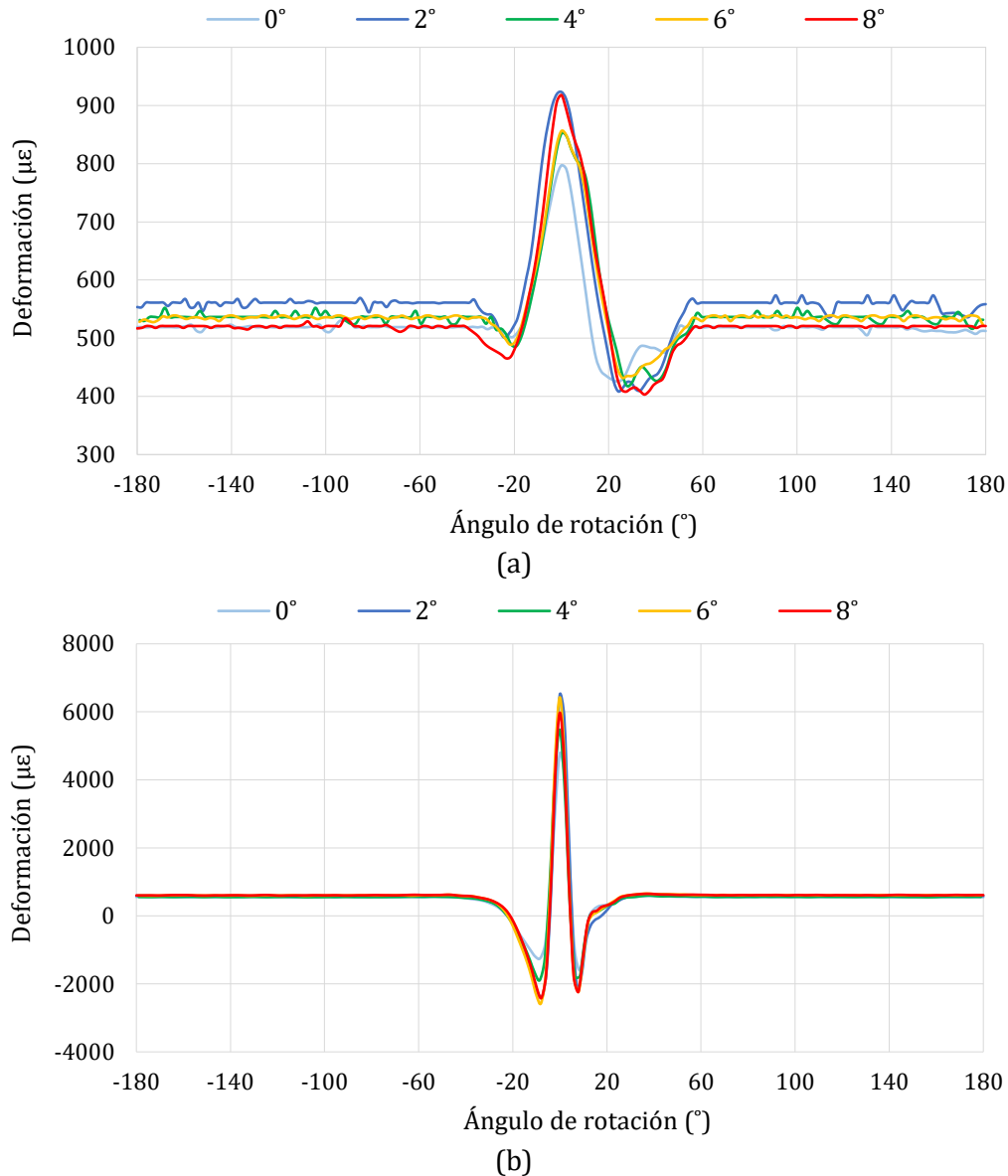


Figura 7.23. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 3 y canal 4 a 250 N y 20 km/h.

Cuando se aumenta la fuerza vertical, las diferencias en las curvas de deformación con la variación del ángulo de deriva son aún más claras. La Figura 7.24 (a) muestra cambios considerables en el pico máximo de deformación a tracción, mostrando que el aumento del ángulo provoca el decremento del valor de pico.

En la Figura 7.24 (b) se muestra que la tendencia cambia a partir de 6°, ya que de 2° a 6° la deformación a tracción a la entrada y salida de la huella de contacto crece de forma monótona mientras que en 8° decrece. Del mismo modo, en el pico máximo de compresión (alrededor de 0° del ángulo de rotación del neumático) la tendencia cambia para 8°.

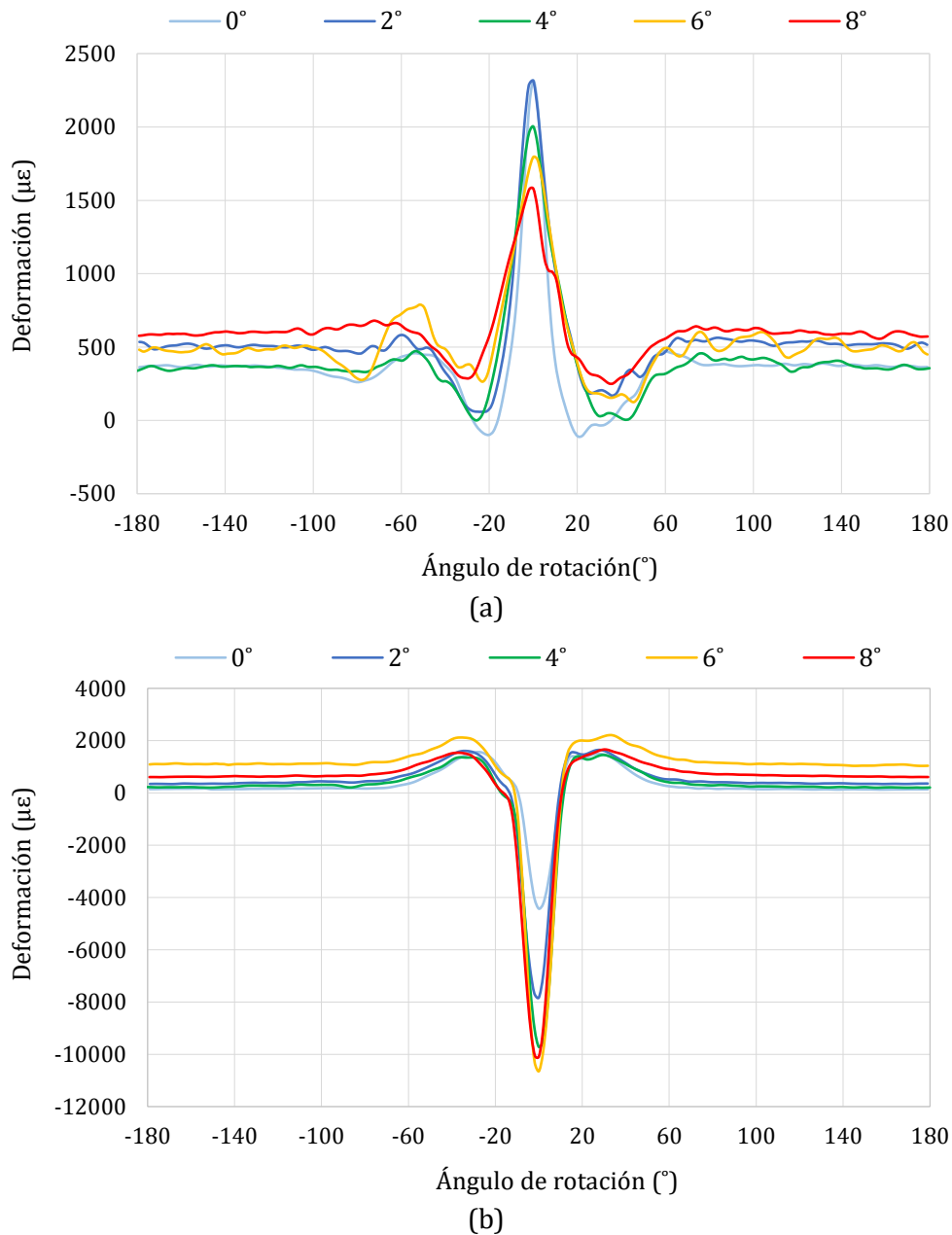


Figura 7.24. Influencia del ángulo de deriva en el (a) canal 3 y (b) canal 5 a 750 N y 20 km/h.

7.2.2 Influencia de la velocidad

7.2.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

La velocidad de rodadura afecta en distinto grado dependiendo de la dirección de medida y del punto significativo de la curva de deformación que se analice.

- **Dirección longitudinal**

En dirección longitudinal, la Figura 7.25 muestra como la velocidad afecta al pico de deformación máxima a tracción, habiendo una diferencia mayor entre los datos obtenidos a 30 km/h y a 50 km/h que entre los obtenidos a 10 y 30 km/h, por lo que la deformación y la velocidad no siguen una proporción lineal.

La deformación máxima a tracción en el canal 2 no sigue una proporción lineal con la velocidad, ya que para algunos ángulos de deriva la deformación máxima se obtiene a 30 km/h y en otros a 50 km/h, lo que dificulta la identificación de la velocidad de rodadura a partir de este punto.

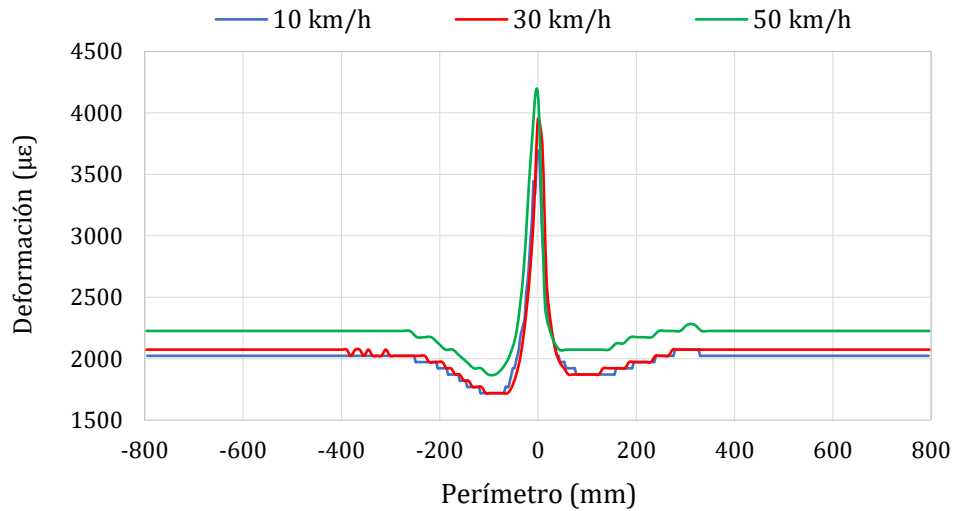
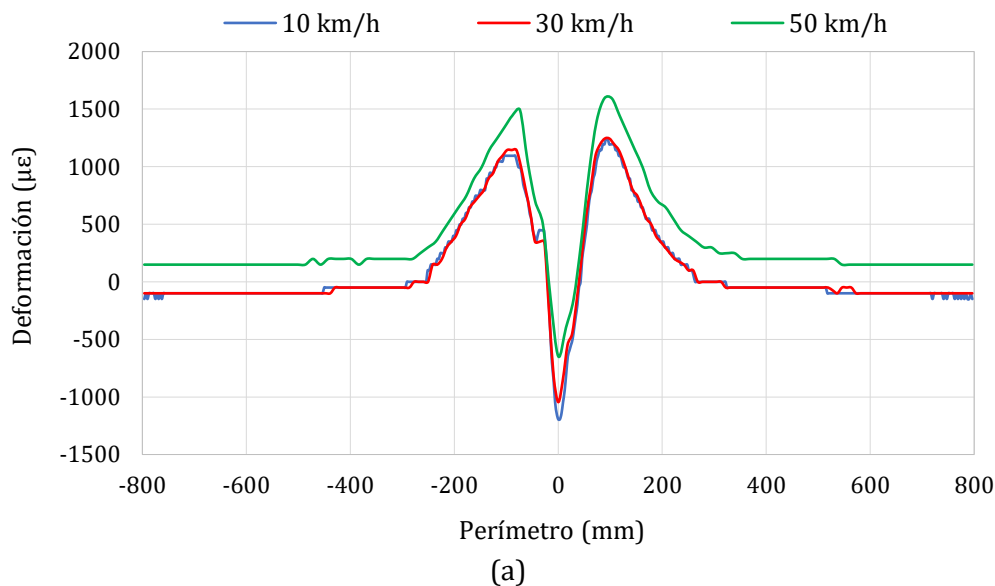


Figura 7.25. Influencia de la velocidad en el canal 2 a 1,2 bar, 750 N y 8°.

- **Dirección lateral**

En dirección lateral, la Figura 7.26 muestra como la velocidad afecta notablemente a todos los puntos significativos de la curva de deformación.

El aumento de la velocidad provoca que la deformación aumente en los picos de máxima deformación a tracción en el canal 1 (ver Figura 7.26 (a)) situado en la parte interior de la huella de contacto (ver Figura 7.19) mientras que en el canal 3 (ver Figura 7.26 (b)) produce el efecto contrario. Es decir, el aumento de la velocidad produce un aumento de la fuerza centrífuga tanto en dirección longitudinal como en dirección lateral, haciendo que los puntos de la huella de contacto situados en la parte interior sufran una compresión mayor, y los que están en la parte exterior lo hagan en cuanto a tracción. Aunque en términos generales este fenómeno afecta a los canales 1 y 3, la variación de la deformación a la entrada y salida de la huella de contacto y la velocidad no son proporcionales.



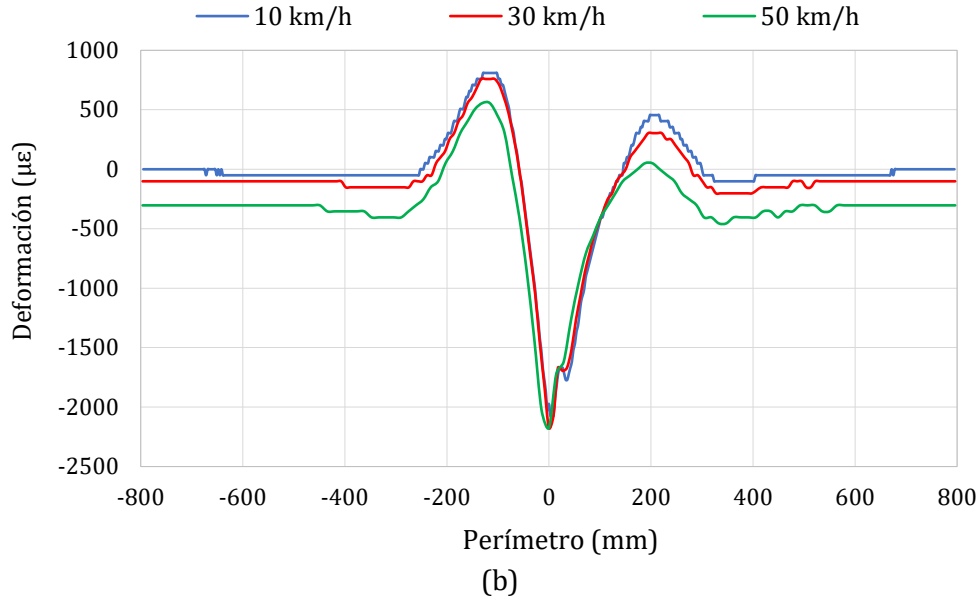


Figura 7.26. Influencia de la velocidad en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1,2 bar, 750 N y 8°.

• Análisis de puntos característicos

En cuanto a la deformación a la entrada y a la salida de la huella de contacto, la Figura 7.27 muestra como las curvas obtenidas a 50 km/h se mantienen generalmente por encima de las otras dos para el caso de la máxima deformación a la entrada de la huella de contacto.

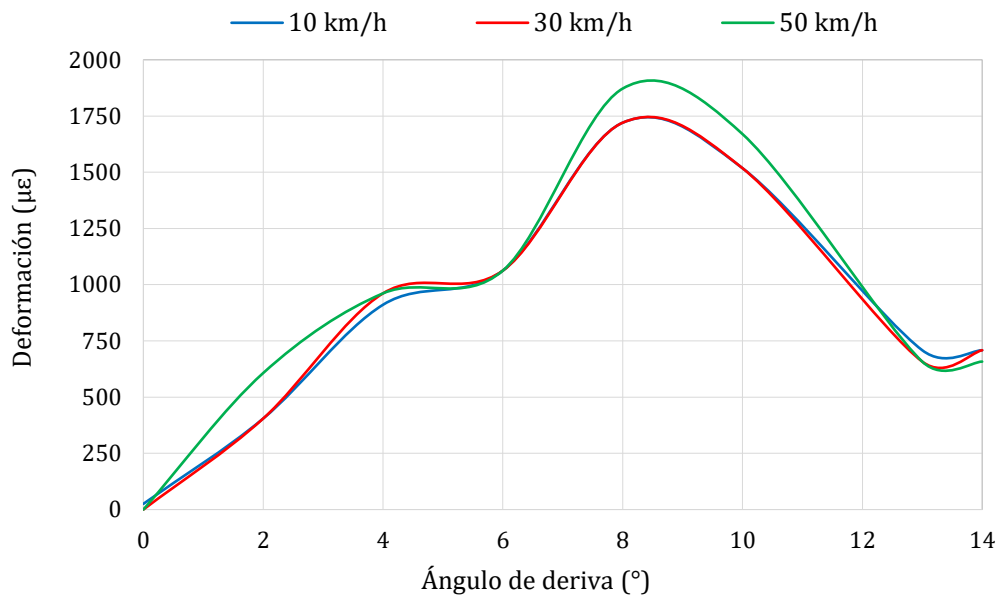


Figura 7.27. Influencia de la velocidad en la entrada de la huella de contacto en el canal 2, 750 N y 1,2 bar.

Finalmente, se puede decir que el *offset* tiene un comportamiento muy parecido al de la deformación a la entrada y salida de la huella de contacto en dirección longitudinal.

El canal 3 muestra como la disminución de la velocidad hace que los picos de deformación a la entrada y salida (ver Figura 7.28) de la huella de contacto se desplacen verticalmente hacia arriba, aunque la proporción no sea lineal, en términos generales el valor de los picos disminuye hasta alcanzar aproximadamente el valor de 10°.

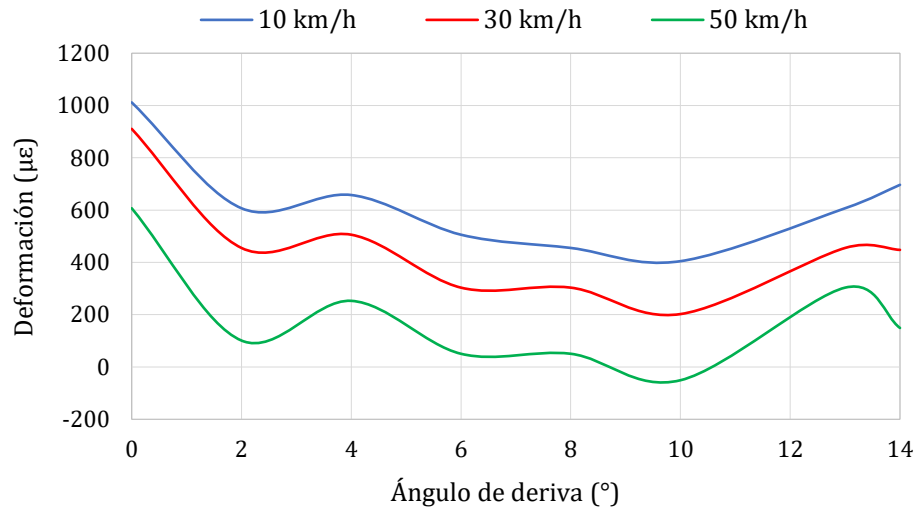


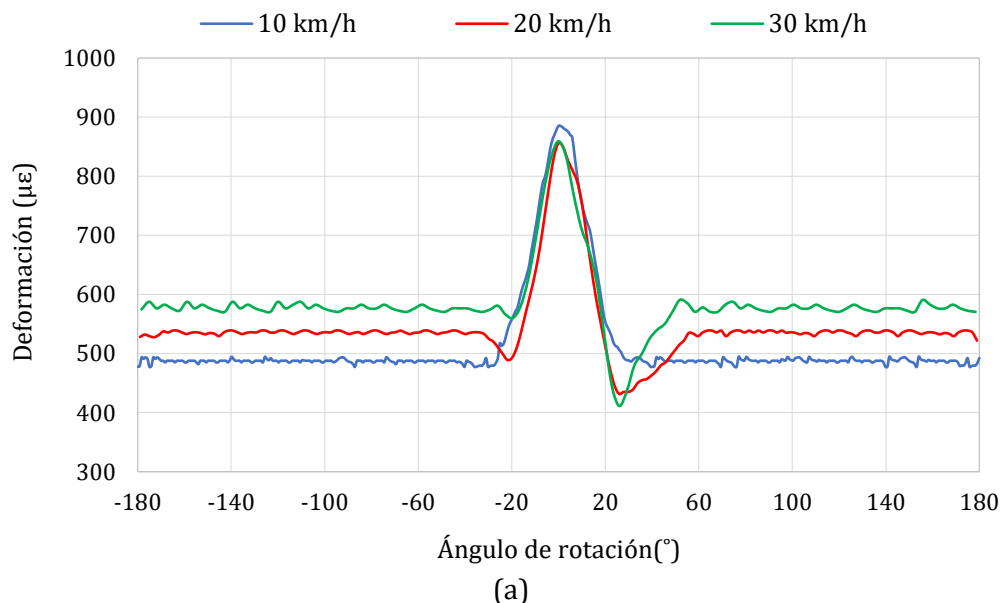
Figura 7.28. Influencia de la velocidad en la salida de la huella de contacto en el canal 3 a 750 N y 1,2 bar.

Por último, los valores del *offset* en dirección lateral no muestran resultados fáciles de relacionar con la variación de las condiciones de trabajo del neumático en lo que a velocidad y ángulo de deriva se refiere, lo que complica su utilización para la identificación de estos parámetros. Con respecto a la variación del ángulo de deriva, cabe destacar que los picos máximos de deformación a tracción en el canal 3 (ver Figura 7.28) son los únicos puntos significativos de la curva que cambian drásticamente la tendencia a partir de 10°.

7.2.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

La velocidad tiene una influencia directa en la deformación del neumático como efecto de la fuerza centrífuga. Como consecuencia de ésta, la variación de la velocidad se refleja en la variación del valor del *offset* en dirección lateral (ver Figura 7.29).

La influencia de la velocidad en los puntos significativos (máximos de deformación a tracción y compresión) no es lineal ya que, por ejemplo, en la Figura 7.29 (b) se observa como en el pico de deformación a compresión a la salida de la huella de contacto, proporciona deformaciones mayores a 20 km/h que a 10 km/h o 30 km/h.



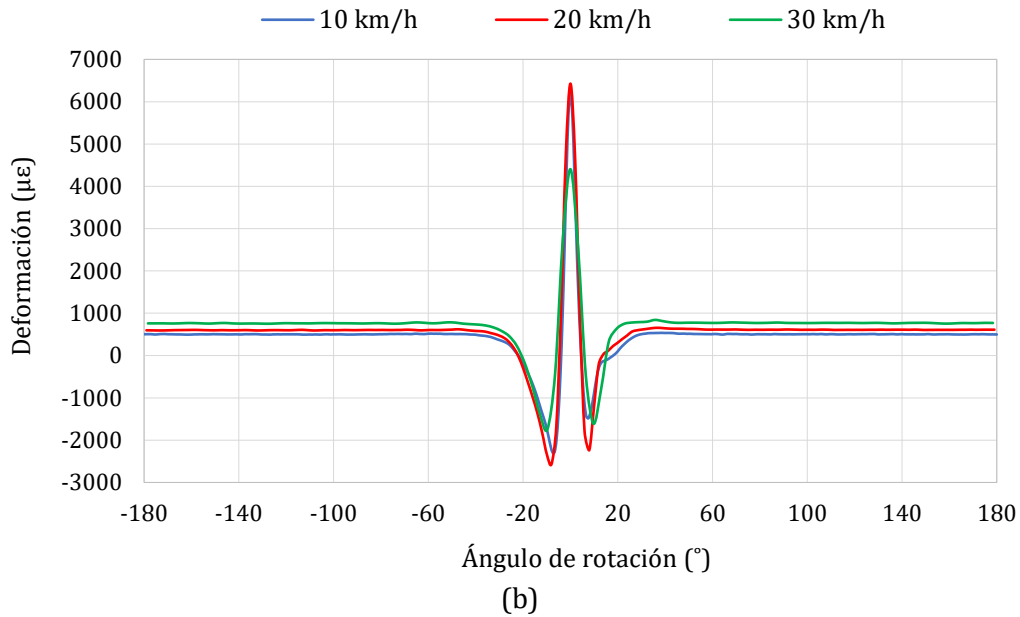


Figura 7.29. Influencia de la velocidad en el (a) canal 3 y (b) canal 4 a 250 N y 6°.

El efecto del ángulo de caída se puede observar con claridad en la diferencia de los valores máximos de deformación de los canales 3 y 4 (ver Figura 7.29 (a) y (b), respectivamente), ya que el valor de la deformación máxima a tracción en el punto medio de la huella de contacto es aproximadamente seis veces mayor en el canal 4 que en el canal 3, ya que están situados en lados opuestos del plano medio longitudinal.

• Análisis de puntos característicos

La velocidad provoca el decremento de la deformación a tracción en el momento del impacto, produciendo el efecto contrario en los puntos de máxima compresión a la entrada y salida de la huella.

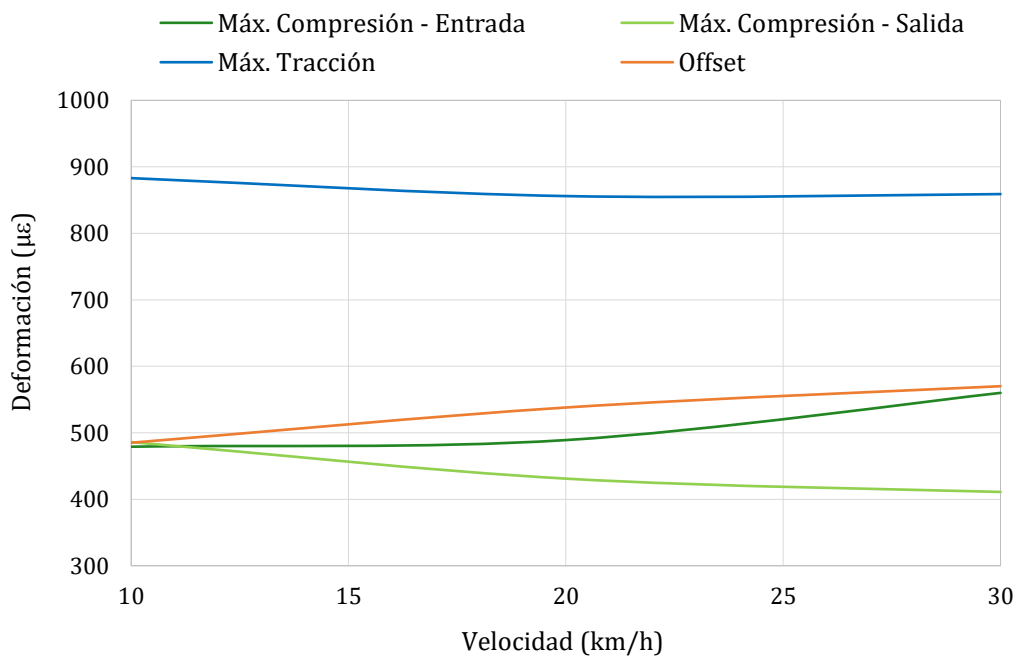


Figura 7.30. Influencia de la velocidad en los picos máximos de deformación en el canal 3 a 250 N y 6°.

El comportamiento en todos los puntos significativos (exceptuando el de máxima tracción) es aproximadamente parabólico, sobre todo en el canal 3 (ver Figura 7.30), ya que en el canal 4, sólo el valor del *offset* aumenta de forma monótona, como se muestra en la Figura 7.31.

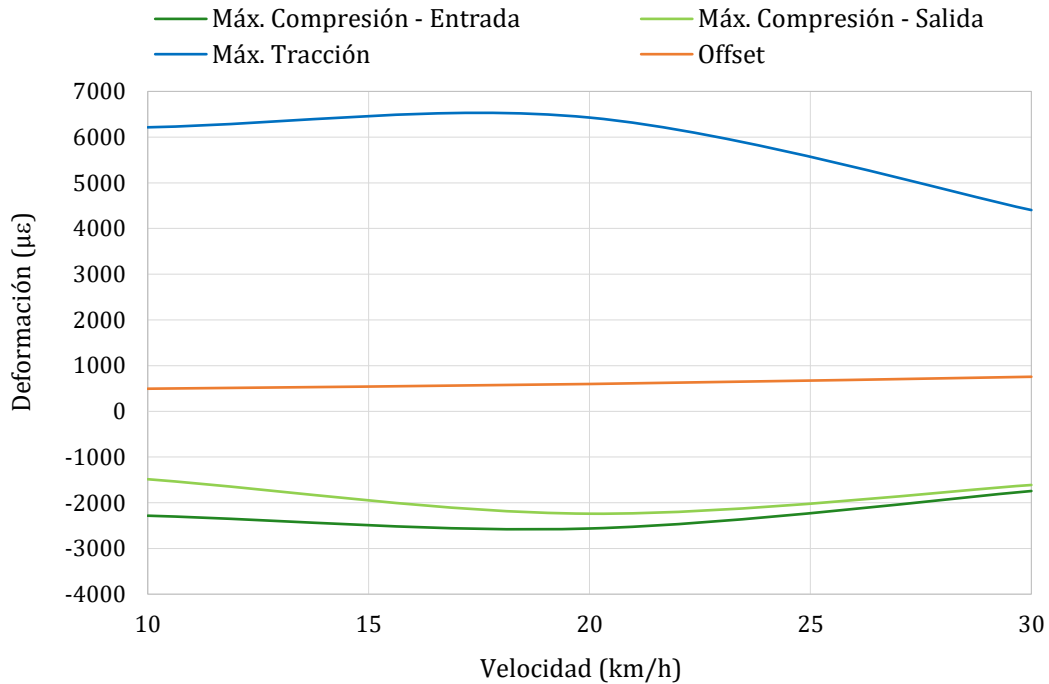


Figura 7.31. Influencia de la velocidad en los picos máximos de deformación en el canal 4 a 250 N y 6°.

En general, se puede concluir que la velocidad es un parámetro cuya influencia es fácilmente identificable a partir de los datos de deformación obtenidos en los picos de máxima compresión y en el *offset*.

7.2.3 Influencia de la presión

7.2.3.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

La variación de la presión, además de tener una influencia directa en la rigidez del neumático, puede modificar drásticamente la forma de la pisada en el contacto neumático-calzada, por ello, su influencia en la deformación, sobre todo en dirección lateral, puede arrojar mucha información con respecto a su variación.

- **Dirección longitudinal**

En dirección longitudinal, la presión no modifica la forma de las curvas de deformación. Cuando ésta aumenta, la amplitud de la curva (entendida como la diferencia entre el pico máximo de deformación a tracción y a compresión) disminuye, es decir, aumenta la rigidez.

La Figura 7.32 ilustra la influencia de la presión sobre los datos de deformación en dirección longitudinal. Se observa como a bajas presiones la deformación a compresión es superior que para presiones superiores.

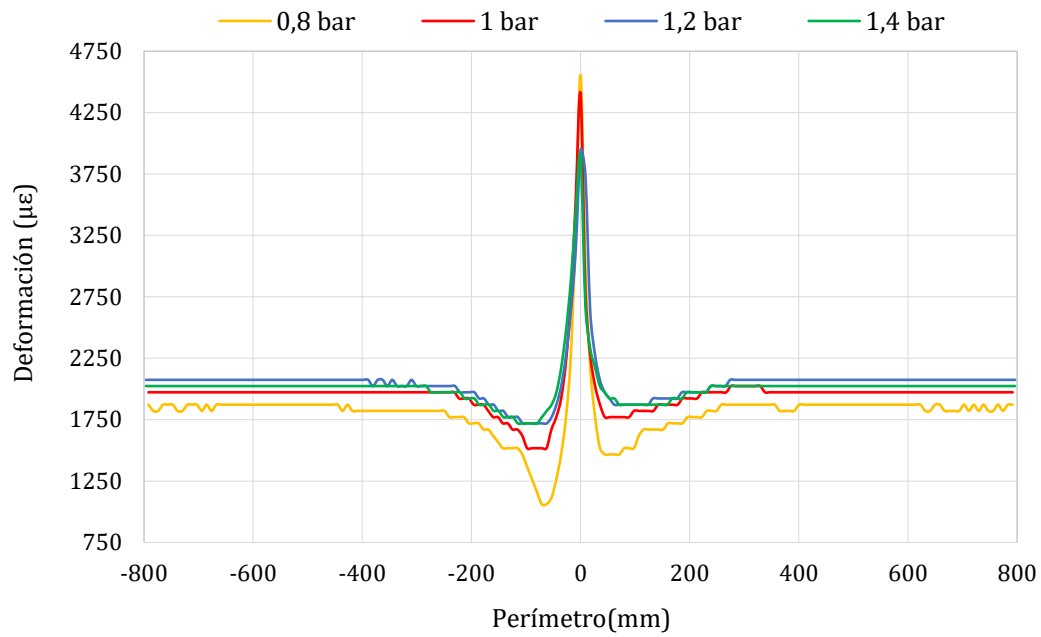
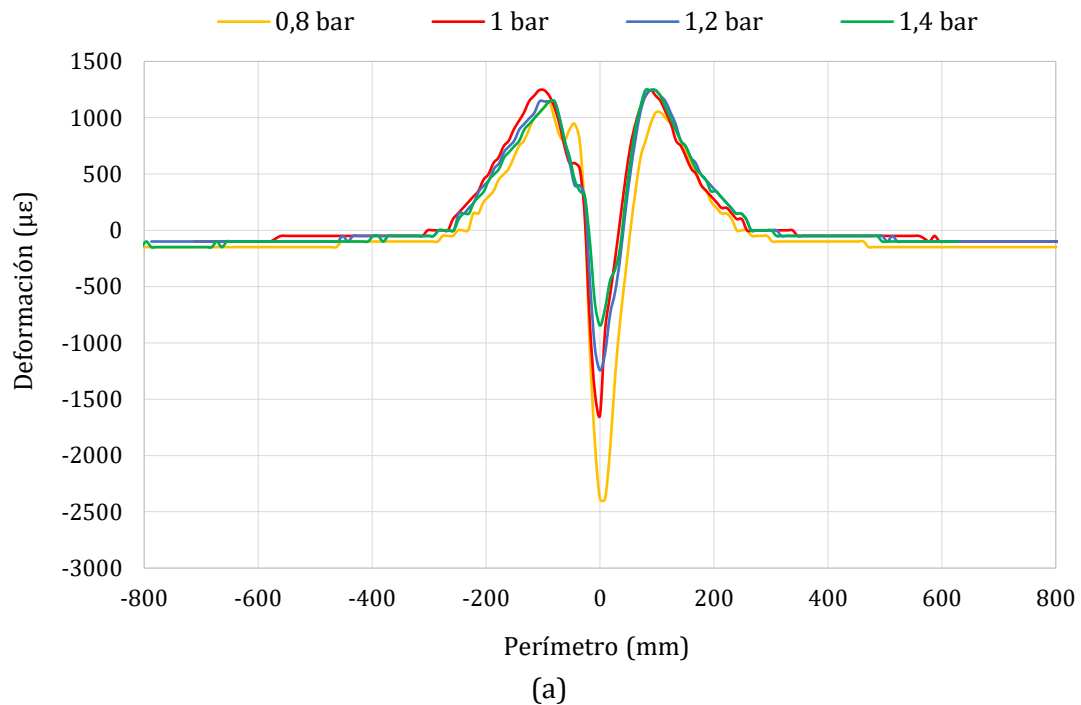


Figura 7.32. Influencia de la presión en el canal 2 a 750 N, 30 km/h y 8°.

- **Dirección lateral**

En dirección lateral la presión afecta de forma dispar a los canales 1 y 3. En la Figura 7.33 (a) se observa como la presión afecta notablemente al punto de máxima compresión, sin embargo, en el canal 3 (ver Figura 7.33 (b)) se producen fluctuaciones alrededor de ese punto que imposibilitan sacar conclusiones.



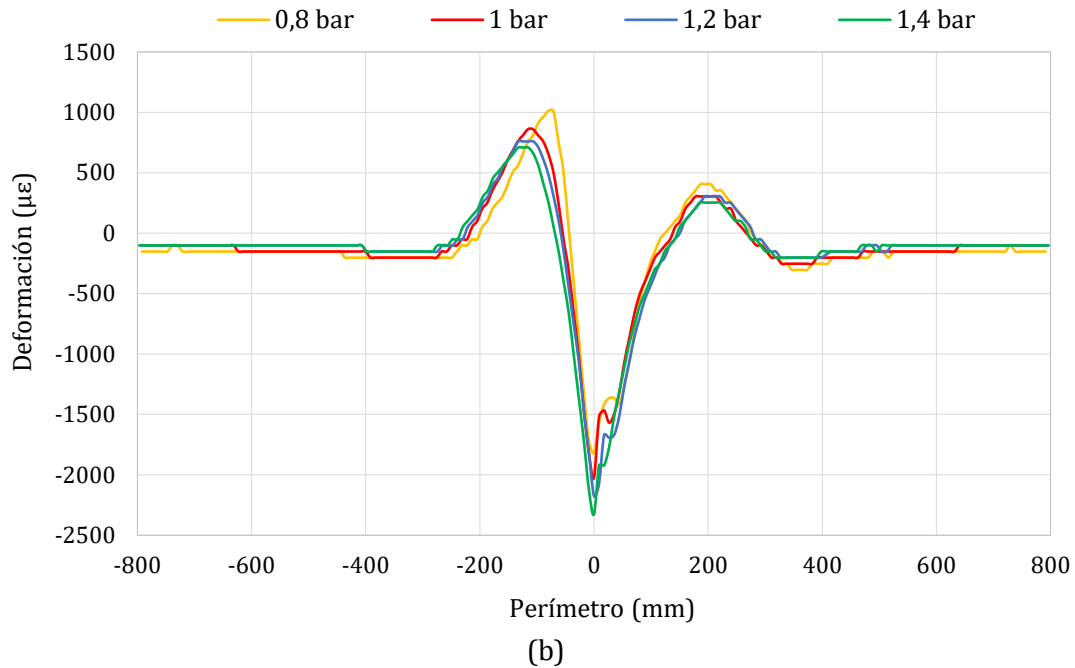


Figura 7.33. Influencia de la presión en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 750 N, 30 km/h y 8°.

- **Análisis de puntos característicos**

La Figura 7.34 muestra como en muchas ocasiones las curvas se entrelazan, lo que dificulta la relación entre la presión y los datos de deformación. Este comportamiento se muestra tanto en los canales que miden en dirección lateral como en el longitudinal.

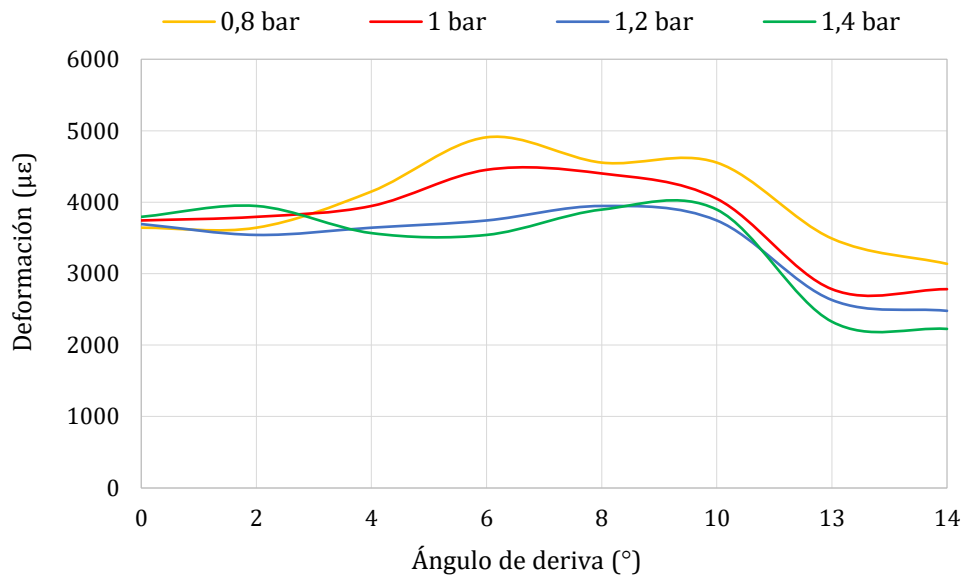


Figura 7.34. Influencia de la presión en la máxima deformación a tracción en el canal 2 a 750 N y 30 km/h.

Por otro lado, la relación entre la presión y la variación de la deformación a la entrada y salida de la huella de contacto es fuertemente no lineal. Adicionalmente, el valor del *offset* parece mostrar que para presiones de inflado por encima de 1 bar la rigidez es mayor y limita las variaciones observadas en la amplitud de las curvas de deformación en función de la presión, ya que para 1,2 y 1,4 bar las curvas prácticamente se superponen.

En dirección lateral, el efecto de la presión al principio y final del área de contacto no es suficientemente claro en el canal 1. Sin embargo, los datos recogidos con el canal 3 fluctúan en menor medida. A presiones altas, por efecto de la rigidez, la influencia de la presión no se aprecia con claridad. Por último, cabe destacar que la variación del *offset* muestra un comportamiento difícil de relacionar con la variación de la presión, sin embargo, al igual que en los otros dos puntos significativos, se muestra un cambio de tendencia cuando el ángulo de deriva es alto.

7.2.3.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

Los ensayos realizados con variaciones de presión con distintos ángulos de deriva, así como condiciones de fuerza vertical y velocidad diferentes mostraron resultados similares a los obtenidos en la primera fase experimental, donde la relación entre la deformación y las variaciones de presión no fueron lo suficientemente claras como para poder establecer patrones de comportamiento. Por este motivo, las conclusiones obtenidas en la segunda fase experimental son equivalentes a las obtenidas en la primera.

7.2.4 Influencia de la fuerza vertical

7.2.4.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

La fuerza vertical, parámetro de gran influencia en la curva $F_y - \alpha$ (ver Figura 6.6), influye de forma evidente en las curvas de deformación, tanto en dirección longitudinal como lateral.

- **Dirección longitudinal**

En la Figura 7.35 se muestra como los cambios en el pico de deformación del centro de la huella de contacto son proporcionales al cambio en la fuerza vertical, y que son mayores que en los puntos de máxima deformación a compresión.

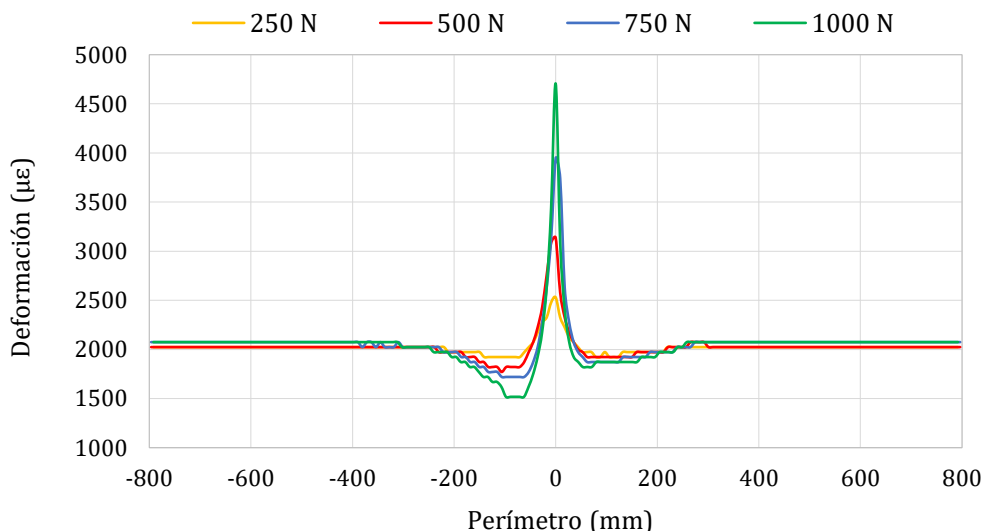


Figura 7.35. Influencia de la fuerza vertical en el canal 2 a 1,2 bar, 30 km/h y 8°.

Tomando como referencia el valor máximo de pico para 250 N, la deformación máxima a tracción se incrementa en un 24% a 500 N, en un 56% a 750 N y en un 86% a 1000 N.

- **Dirección lateral**

En dirección lateral la fuerza vertical afecta de forma similar a ambos canales en los valores de deformación máxima a tracción, sin embargo, la fuerza vertical cambia notablemente la morfología de la curva en la parte central, alrededor del punto de contacto, como muestra la Figura 7.36. Los valores máximos de deformación compresión no son lineales ni en el canal 1 ni en el canal 3, mostrando valores muy dispares. Esto parece indicar que es posible extraer información más clara (de cara a las herramientas de estimación que se utilizarán posteriormente) de los valores de tracción máxima y, más concretamente, del pico de valor máximo que se localiza al principio del área de contacto.

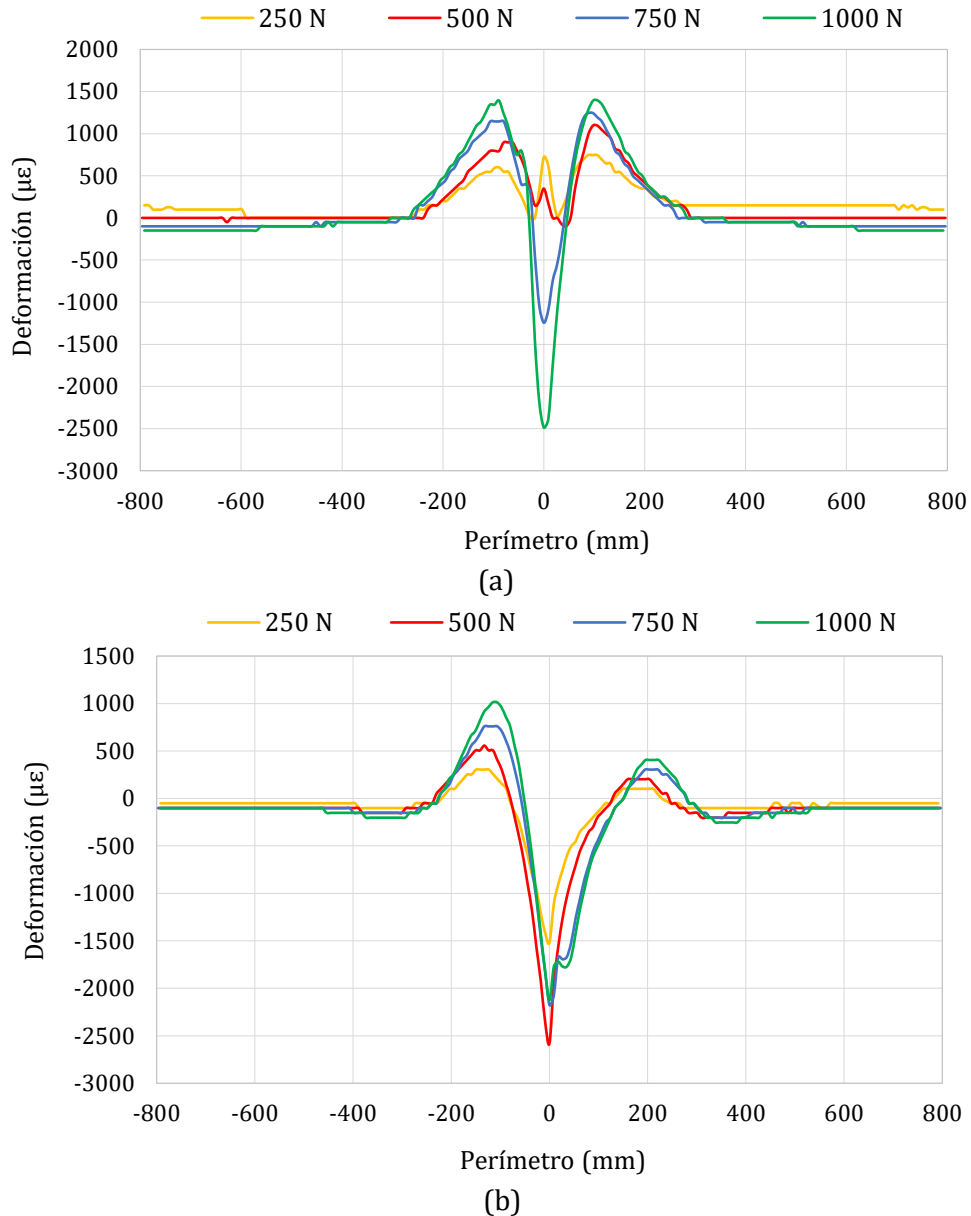


Figura 7.36. Influencia de la fuerza vertical en el (a) canal 1 y (b) canal 3 a 1,2 bar, 30 km/h y 8°.

El cambio producido a fuerzas verticales bajas en el canal 1 (ver Figura 7.36 (a)) merece especial atención, puesto que este cambio en la morfología de la curva no se observa con las variaciones de presión o velocidad. En la Figura 7.37 se observa como, cuando la fuerza vertical es baja, se produce un pico de máxima deformación a tracción alrededor del punto de contacto, mientras que en el canal 3 ese pico es de compresión.

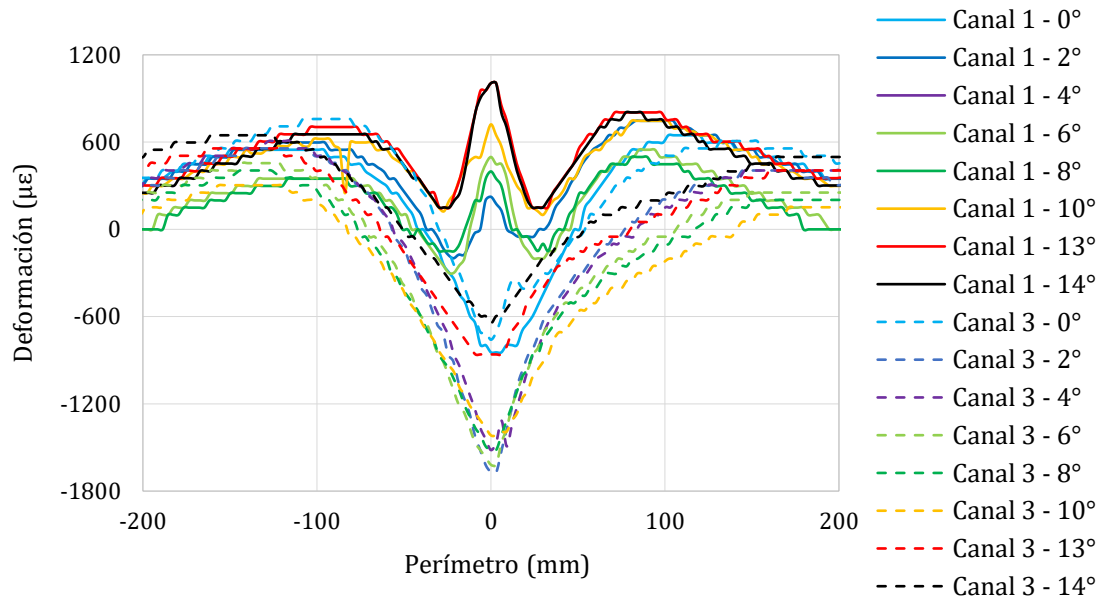


Figura 7.37. Diferencias morfológicas en las curvas del canal 1 y 3 con fuerza vertical baja.

En primer lugar, la Figura 7.38 (a) muestra como este efecto no es a causa del ángulo de deriva (en este caso las curvas son a 6° en vez de a 8°), sino como resultado de la variación de la fuerza vertical. La Figura 7.38 (b) muestra que este efecto se produce para todos los ángulos mayores de 0°, siempre y cuando la fuerza vertical sea baja. Además, la Figura 7.38 (c) y (d) muestra como el pico de deformación a tracción se observa tanto variando la velocidad como la presión.

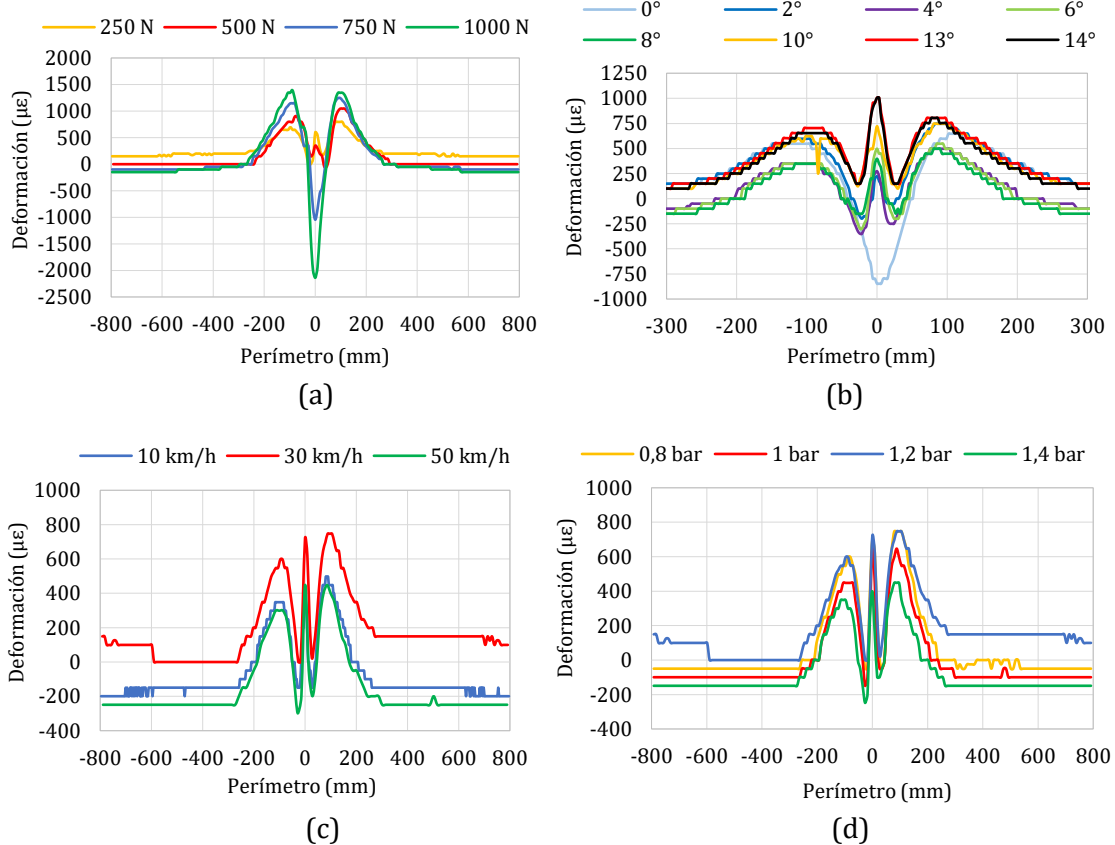


Figura 7.38. (a) Influencia de la fuerza vertical (1,2 bar, 30 km/h, 6°); (b) del ángulo (1,2 bar, 10 km/h, 250 N); (c) de la velocidad (1,2 bar, 250 N, 8°) y; (d) de la presión (1,2 bar, 30 km/h, 8°) en el canal 1.

Aunque no está claro el motivo por el cual se produce este efecto, si se tiene en cuenta que alrededor de este punto, en función de las condiciones de trabajo, se encuentran además fluctuaciones que dificultan la toma de decisiones para monitorizar las condiciones de trabajo, este hecho descarta totalmente este punto significativo como fuente de información para lograr estimaciones de los parámetros de funcionamiento.

- **Análisis de puntos característicos**

El comportamiento del punto de máxima deformación a tracción con la variación de la fuerza vertical se muestra en la Figura 7.39. Como se observa, las curvas están claramente diferenciadas, obteniéndose mayores valores de deformación cuanto mayor es la fuerza vertical.

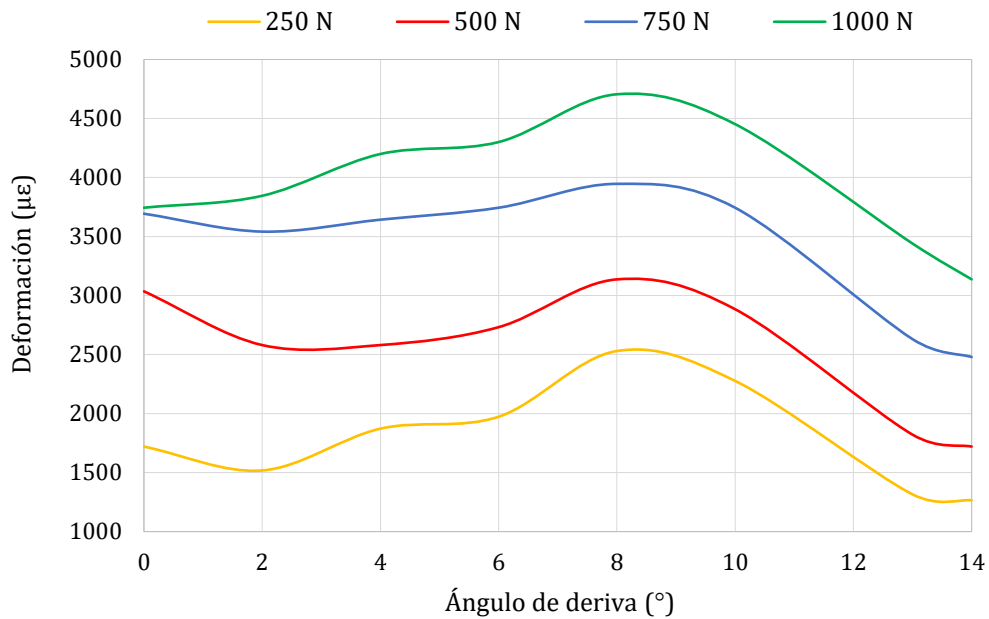


Figura 7.39. Influencia de la fuerza vertical en la deformación a tracción en el canal 2 a 30 km/h y 1,2 bar.

Por otro lado, como se observa en la Figura 7.40, el incremento de fuerza vertical tiene mayor influencia al principio de la zona de contacto, cerca de -100 mm (ver Figura 7.35), donde aparece el primer valor máximo de deformación por compresión, que al final de la huella de contacto. Resulta interesante indicar que, dado que el canal 2 registra la deformación en dirección longitudinal, está directamente relacionado con los procesos de aceleración y frenado.

Por este motivo, las diferencias entre los valores máximos de deformación a compresión (mínimos locales) al principio y al final de la zona de contacto pueden deberse a procesos de aceleración y frenado que se producen en determinadas zonas de la huella de contacto por el hecho de introducir un ángulo de deriva. Esto parece mostrar que ambos lados de la banda de rodadura trabajan en condiciones distintas dependiendo de la zona de la misma, registrando tracción o compresión en función del sentido de giro. Debido a esto, se observa que un lado de la línea media de la banda de rodadura está trabajando a tracción, mientras que el otro está siendo frenado y muestra compresión.

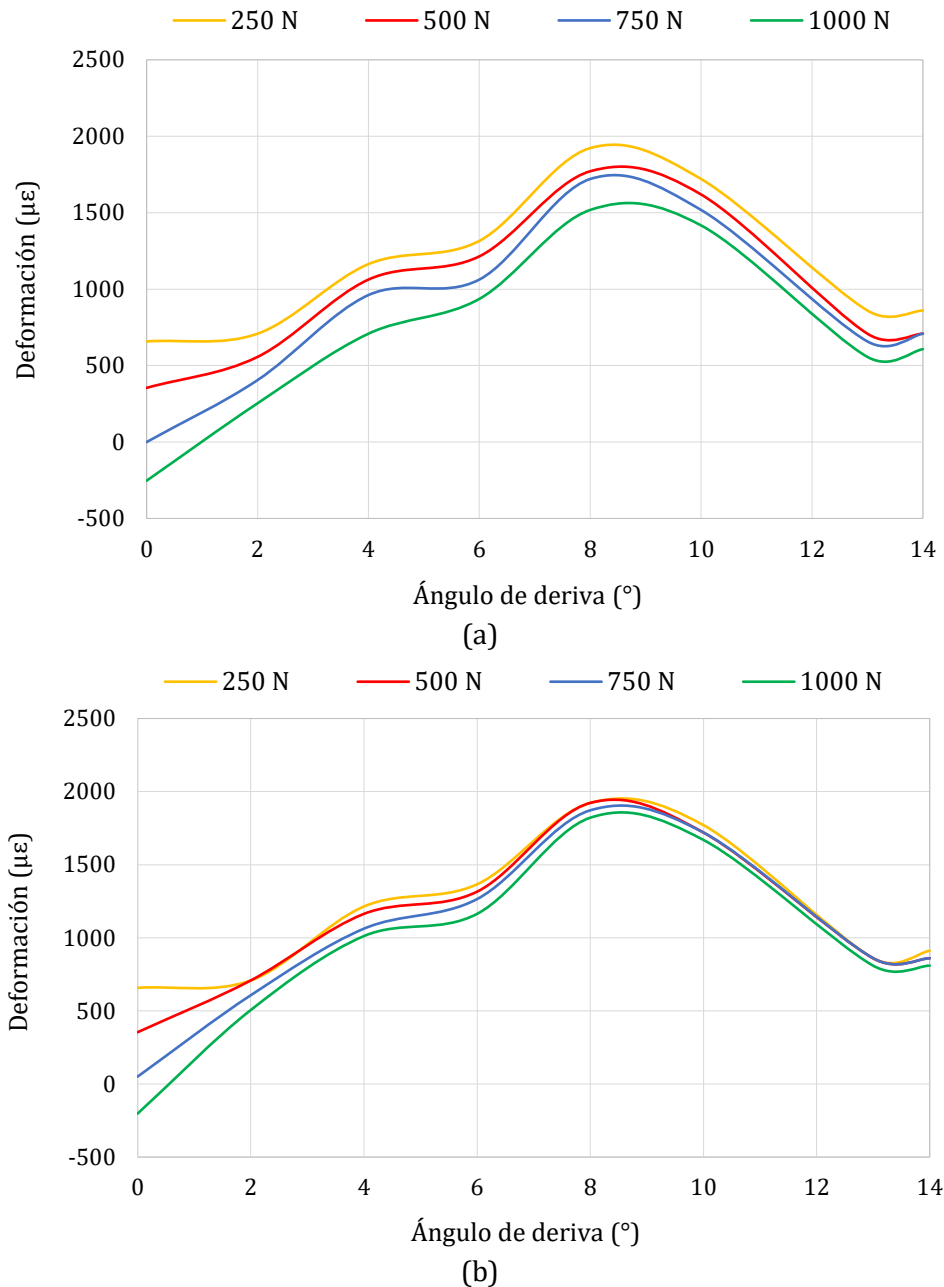


Figura 7.40. Influencia de la fuerza vertical en la (a) entrada y (b) salida de la huella de contacto en el canal 2 a 30 km/h y 1,2 bar.

La fuerza vertical tiene una influencia muy pequeña sobre el valor del *offset*, las curvas, a pesar de ser a fuerzas muy distintas, muestran deformaciones muy parecidas. Por último, es destacable que todos los puntos significativos muestran un cambio de tendencia cuando el ángulo de deriva sobrepasa el valor de 8° .

En dirección lateral, a pesar del fenómeno que se produce en el momento del impacto, la influencia de la fuerza vertical sí es notoria en el valor máximo a tracción en el canal 1, ya que aumenta al principio y final del área de contacto al aumentar la fuerza vertical, como se muestra en la Figura 7.41.

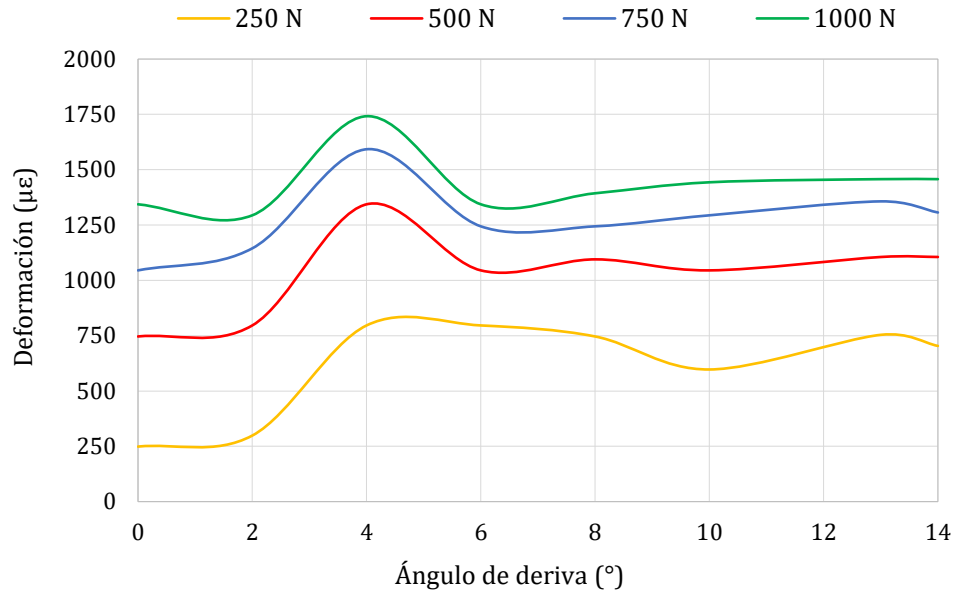


Figura 7.41. Influencia de la fuerza vertical en la salida de la huella de contacto en el canal 1 a 30 km/h, 1,2 bar.

Con respecto al canal 3, de igual modo que en los otros dos canales, la fuerza vertical afecta a los valores de deformación a tracción tanto a la entrada como a la salida del área de contacto, manteniéndose una buena relación entre ambos parámetros. En la Figura 7.42 se muestra el comportamiento de la deformación a la entrada de la huella de contacto en el canal 3, teniendo la deformación a la salida un comportamiento similar.

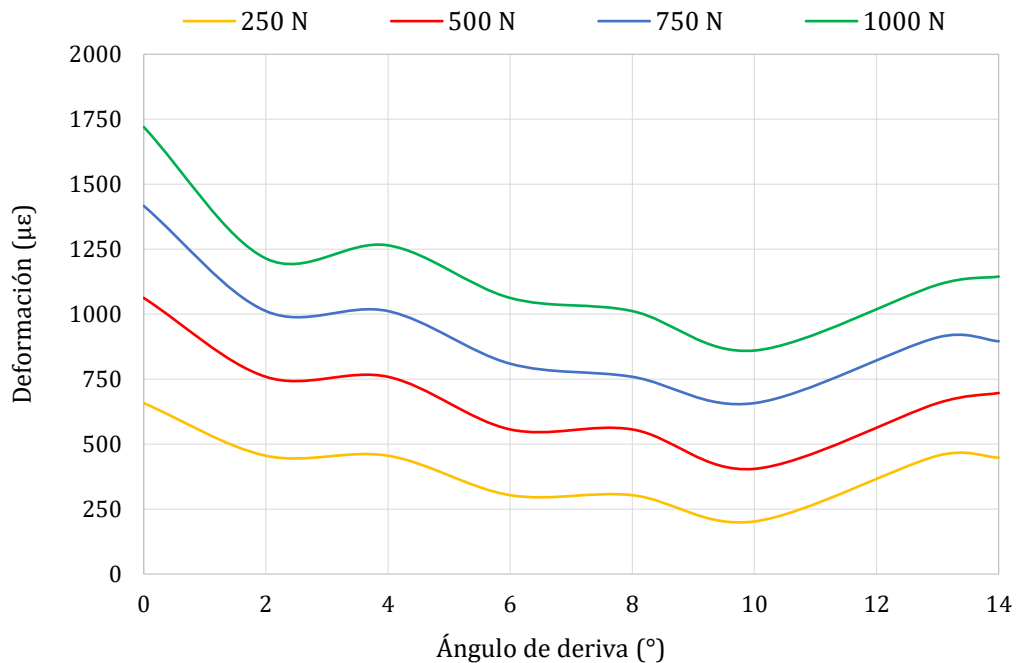


Figura 7.42. Influencia de la fuerza vertical en la entrada de la huella de contacto en el canal 3 para 30 km/h y 1,2 bar.

Finalmente, cabe destacar que los valores del *offset* en dirección lateral no siguen un comportamiento muy claro con respecto a la variación de la fuerza vertical.

7.2.4.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

La fuerza vertical, como se demostró en la primera fase experimental, es el factor más influyente en la deformación del neumático tanto en condiciones de línea recta como en el paso por curva. En la Figura 7.43 se muestran comparativas en los canales 3 y 5 para distintas fuerzas verticales. Estos canales están situados a distancias diferentes del plano medio longitudinal. Además, el canal 3 mide en dirección longitudinal mientras que el canal 5 lo hace en dirección lateral.

En dirección longitudinal (ver Figura 7.43 (a)), la fuerza vertical hace que el pico de máxima deformación a tracción y la deformación al comienzo de la huella de contacto tengan una tendencia monótona creciente. Sin embargo, los resultados no son tan claros en la deformación que se produce a la salida de la misma.

En cuanto a la deformación en dirección lateral, el canal 5 (ver Figura 7.43 (a)) muestra que la fuerza tiene un efecto sustancial sobre el valor del *offset* y los puntos significativos de la curva.

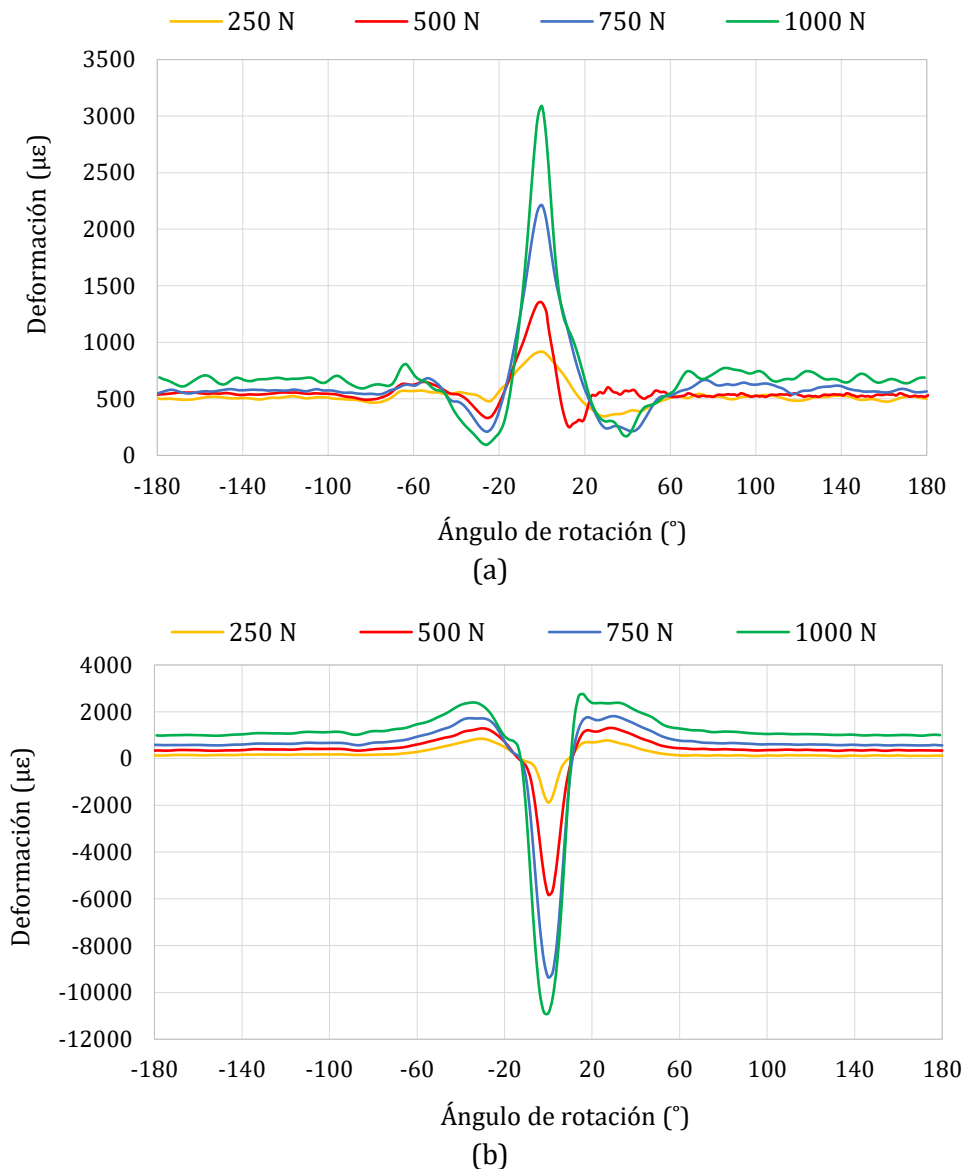


Figura 7.43. Influencia de la fuerza vertical en el (a) canal 3 y (b) canal 5 a 4° y 20 km/h.

En general, el aumento de la fuerza vertical provoca un aumento tanto de la deformación a tracción a la entrada y salida del contacto neumático-calzada como de la deformación a compresión en el momento del impacto, aunque en este último punto, la tendencia de los resultados no es tan lineal como en los otros dos.

- **Análisis de puntos característicos**

La fuerza vertical provoca un aumento drástico del valor de deformación en el momento de la pisada en el canal 3, triplicando su valor de 250 a 1000 N, como se ilustra en la Figura 7.44. Además, los puntos de deformación a tracción disminuyen ligeramente con el aumento de la misma, mientras que el *offset* aumenta prácticamente en la misma proporción.

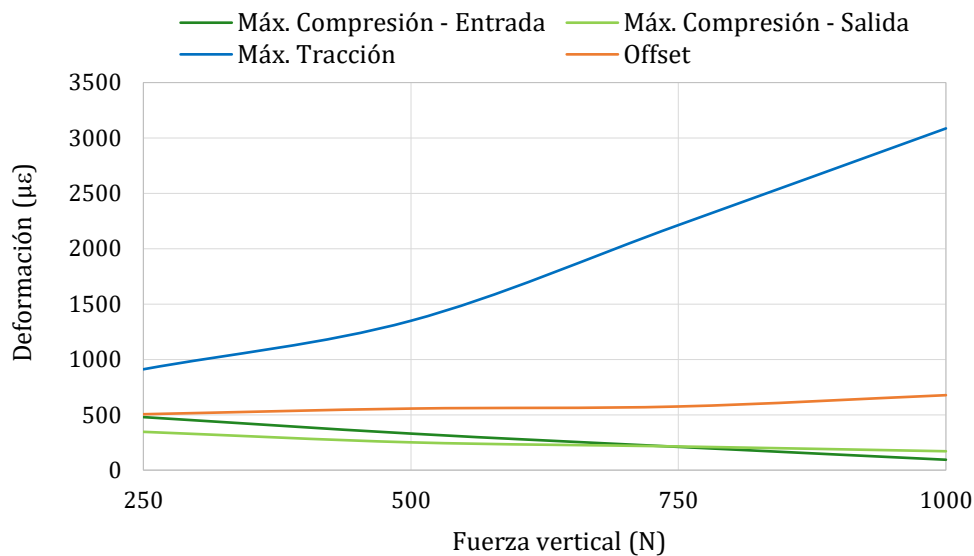


Figura 7.44. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 3 a 250 N y 6°.

En el canal 5, el comportamiento de los puntos de máxima deformación a tracción a la entrada y salida de la huella guarda una relación aproximadamente lineal con el aumento de la fuerza vertical, ya que los valores aumentan gradualmente cuando la fuerza sobre el neumático aumenta. Por otro lado, la deformación a compresión tiene un comportamiento de tipo parabólico.

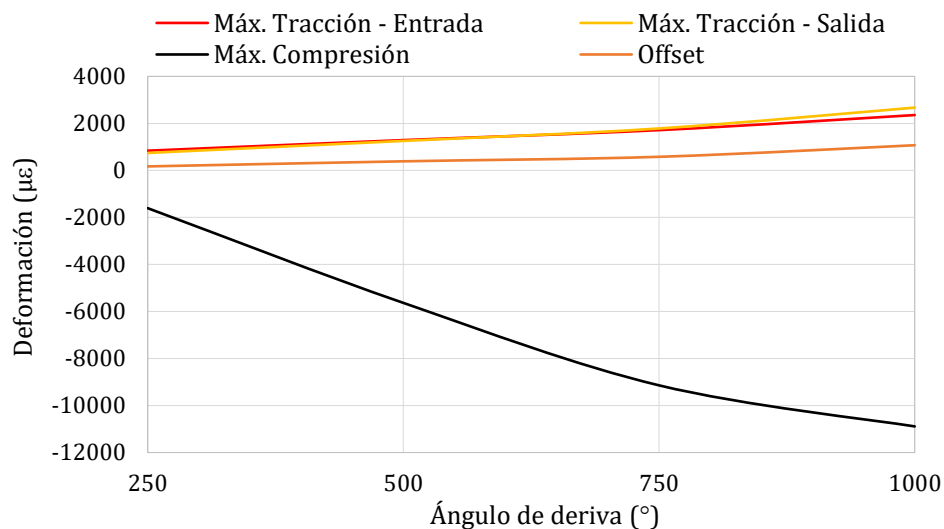


Figura 7.45. Influencia de la fuerza vertical en los picos máximos de deformación en el canal 5 a 250 N y 6°.

7.2.5 Comportamiento de la fuerza lateral

7.2.5.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

El banco de ensayos permite obtener información sobre la fuerza lateral de manera continua a lo largo de todo el ensayo en función del ángulo de deriva. Este tipo de curvas se han obtenido para todas las condiciones de ensayo, dando como resultado variaciones muy pequeñas en la forma de la curva y un desplazamiento vertical de la misma. Es decir, en función de las variables fijadas en el ensayo se obtienen diferentes valores de fuerza, pero la forma de la curva que define la relación $F_y - \alpha$ permanece prácticamente idéntica. Esto es muy interesante, ya que, desde el punto de vista de la deformación también cabe esperar una relación de morfología estable y que “únicamente” varíen los valores numéricos (variaciones cuantitativas, pero no cualitativas).

Durante el giro, los neumáticos se deforman lateral y longitudinalmente, causando cambios en la deformación de la huella del neumático. Como consecuencia, los neumáticos generan fuerzas laterales para dirigir el vehículo a lo largo de una trayectoria concreta. Si la transmisión de fuerzas en el contacto es adecuada, el neumático presenta deslizamientos muy pequeños y, como resultado, el vehículo sigue la trayectoria correctamente. La relación entre las fuerzas laterales y los ángulos de deriva determina en buena medida la dinámica lateral del vehículo.

En la Figura 6.6 se describió el comportamiento de la fuerza lateral con el ángulo de deriva y la fuerza vertical. En la primera fase experimental, los valores máximos de fuerza lateral se alcanzaron entre 5° y 10° , es decir, en la región de transición. Esto significa que en todo ese rango de funcionamiento el neumático está trabajando en el límite de adherencia, solicitando la máxima disponible. Entre 0° y 5° , y entre 10° y 14° , no se produce la máxima transferencia de fuerzas (por razones muy diferentes para ambos casos), por lo que no se está solicitando la máxima adherencia disponible en esas condiciones dinámicas. Entre 0° y 5° , región elástica, el neumático no está sometido a condiciones de trabajo muy exigentes, por lo que la fuerza transmitida al banco de ensayos es inferior a la que podría alcanzarse con la adherencia disponible el contacto neumático-tambor. Sin embargo, a partir de 10° , región de deslizamiento, las características tribológicas de la superficie, y en concreto el coeficiente de adherencia en dicho contacto, comienzan a afectar al funcionamiento del neumático de un modo capital; esto es, las características tribológicas del contacto no permiten transmitir la fuerza que el neumático necesita transmitir para no deslizar sobre la superficie.

En la Figura 7.46 se muestran los resultados experimentales obtenidos de fuerza lateral y ángulo de deriva para distintas velocidades.

Tal y como se puede observar, la influencia de la velocidad queda prácticamente restringida a los valores por encima de 3° de ángulo de deriva. Esto indica que la velocidad influye en la curva $F_y - \alpha$ a través de su influencia sobre el límite de adherencia. Por este motivo, únicamente para valores elevados de sollicitación de adherencia se producen cambios en la curva.

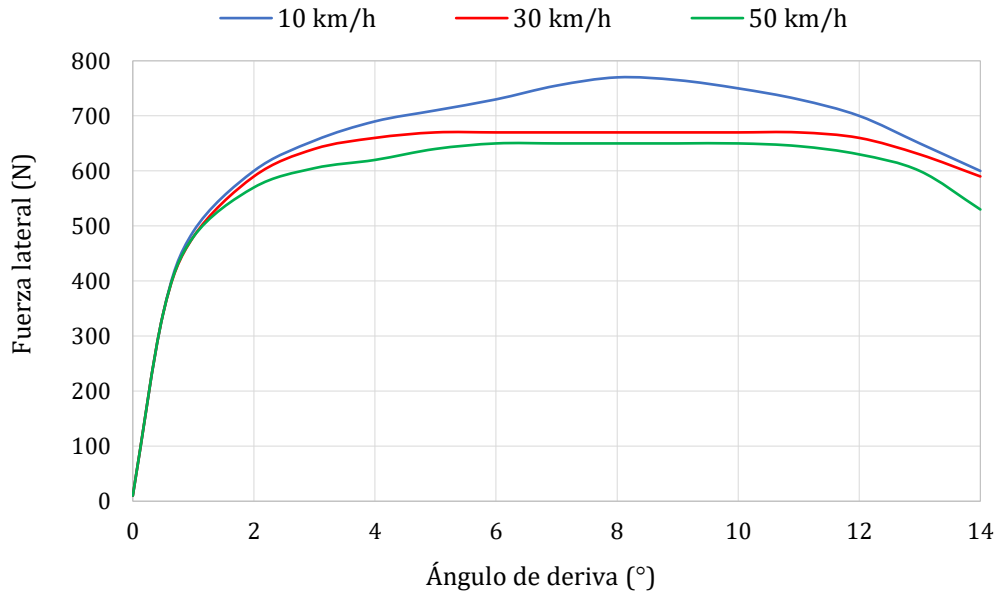


Figura 7.46. Fuerza lateral en función del ángulo de deriva para distintas velocidades a 0,8 bar y 750 N.

Analizando las deformaciones a compresión en dirección longitudinal (ver Figura 7.27) como a compresión en dirección lateral (ver Figura 7.28) se observa una relación clara con el ángulo de deriva, en comparación con la curva $F_y - \alpha$.

También se aprecia una relación más clara y directa entre el comportamiento de los valores de deformación del *offset* en dirección longitudinal y las fuerzas laterales registradas para distintos ángulos de deriva.

En la Figura 7.47 se muestran los resultados experimentales obtenidos de fuerza lateral y ángulo de deriva para distintas presiones de inflado.

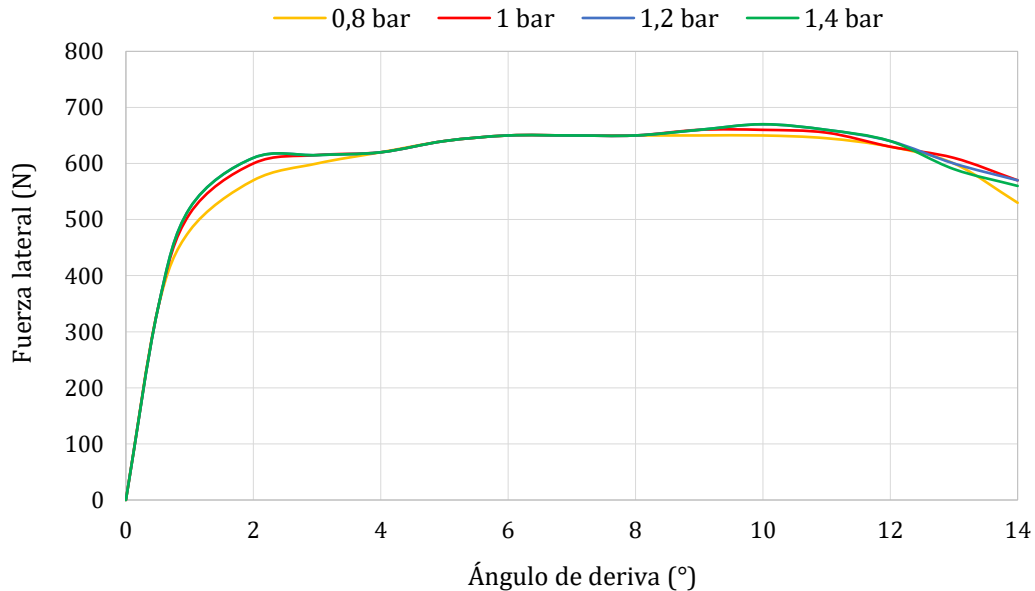


Figura 7.47. Fuerza lateral en función del ángulo de deriva para distintas presiones a 50 km/h y 750 N.

Tal y como se puede observar, la influencia de la presión es aún menor que la de la velocidad, arrojando diferencias muy pequeñas que solamente se pueden estudiar desde un punto de vista estadístico profundo. Esto ha permitido despreciar su aportación en algunos

de los estudios de estimación realizados en los siguientes capítulos, simplificando procesos, reduciendo tiempo de ejecución y sin apreciarse una merma significativa en la precisión.

Analizando la deformación en dirección lateral, pero especialmente en dirección longitudinal (ver Figura 7.34), se observa una relación similar a la mostrada para las variaciones de velocidad y fuerza vertical. Nuevamente, es bastante clara la relación entre los puntos de máxima deformación frente al ángulo de deriva, en comparación con la curva $F_y - \alpha$.

En la Figura 7.48 se muestran los resultados experimentales obtenidos de fuerza lateral y ángulo de deriva para distintas fuerzas verticales. A pesar de haber obtenido resultados para 250, 500, 750 y 1000 N, únicamente se muestran los resultados de estas dos últimas fuerzas. Esto es debido a que, por un problema en uno de los actuadores hidráulicos, el equipo de ensayo no permitió mantener un valor de F_z constante y estable para valores bajos de fuerza vertical (por debajo de 700 N). Así pues, para esta parte del análisis se han tomado únicamente aquellos valores de fuerza que garantizan una repetitividad adecuada. Se deja como desarrollo futuro la ampliación del rango de medida tras la subsanación de los problemas en el equipamiento de ensayo.

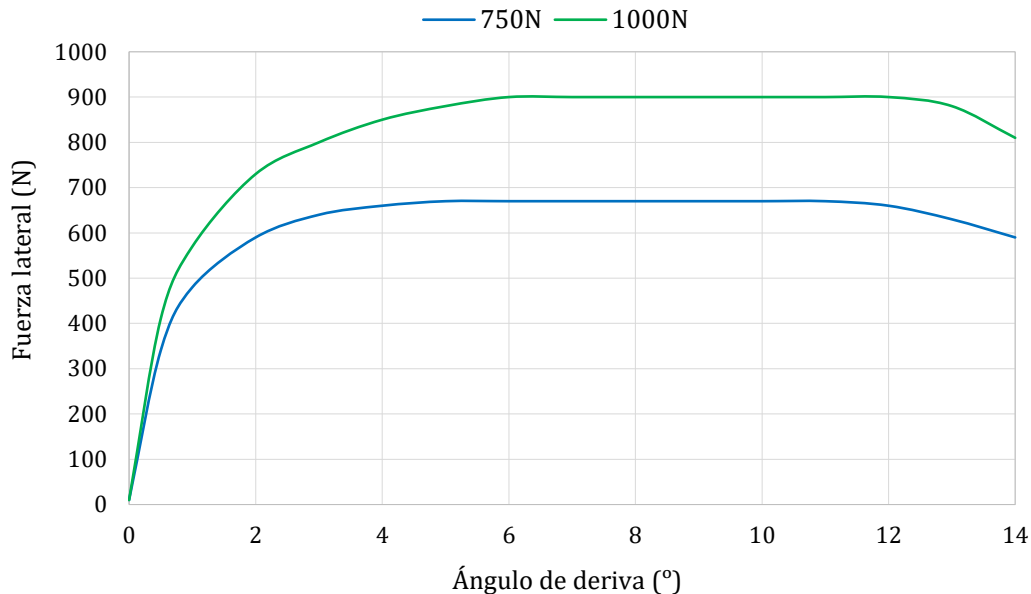


Figura 7.48. Fuerza lateral en función del ángulo de deriva para distintas fuerzas verticales a 0,8 bar y 30 km/h.

Tal y como se puede observar, la fuerza vertical produce un claro desplazamiento vertical en la curva $F_y - \alpha$. Sin embargo, desde un punto de vista cualitativo mantiene una morfología muy semejante. Analizando las deformaciones tanto longitudinales como laterales, se observa una relación clara de los puntos de máxima tracción frente al ángulo de deriva, por comparación con la curva $F_y - \alpha$. Esta relación se puede apreciar prácticamente en todos los puntos significativos de las curvas de deformación; máxima deformación a tracción (ver Figura 7.39) y a compresión (ver Figura 7.40) en dirección longitudinal, así como en los valores del *offset*; y la máxima deformación a tracción en los canales laterales (ver Figura 7.41 y Figura 7.42).

Como principal conclusión, por normal general el neumático comienza a deslizar aproximadamente a partir de 10°, y es entonces cuando los picos de deformación máxima cambian significativamente su tendencia en todos los canales de medición.

7.2.5.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

En esta sección, se muestran algunos resultados del comportamiento de la fuerza lateral registrada por la célula de carga del banco de ensayos durante los ensayos en curva. A diferencia de los ensayos realizados en la primera fase experimental, en esta ocasión el ángulo de deriva, factor más influyente junto a la fuerza vertical en el comportamiento de la fuerza lateral, se varió de 0 a 8°. La duración de los ensayos y las condiciones exigentes, principalmente por el ángulo de caída, unido al tipo de compuesto del neumático, hicieron que la parte sobrecargada del neumático sufriera sobrecalentamiento, provocando el desprendimiento de las capas a partir de 8°, como se muestra en la Figura 7.49.



Figura 7.49. Desprendimiento de capas del neumático por efecto del sobrecalentamiento.

En la Figura 7.50 se muestra el comportamiento de la fuerza lateral para 20 km/h.

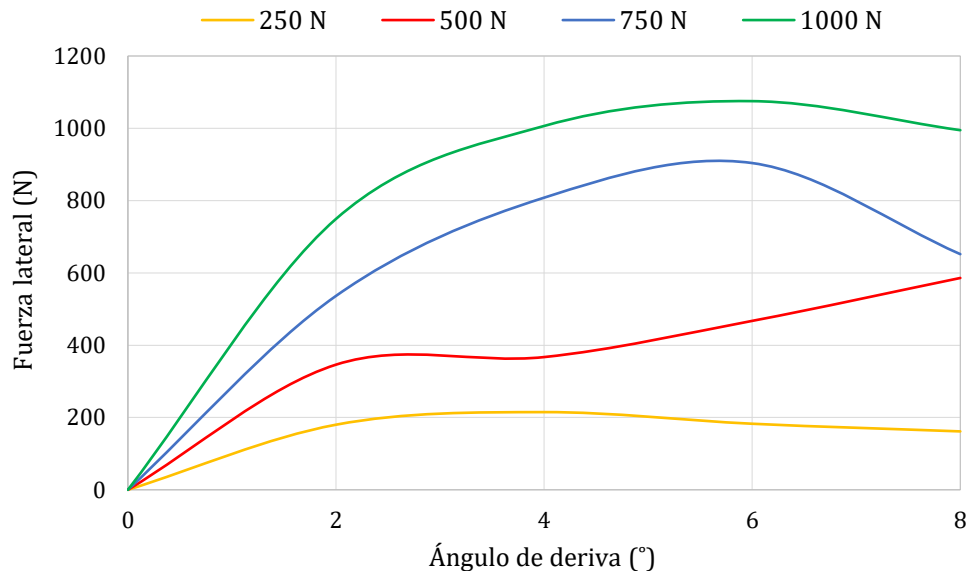


Figura 7.50. Comportamiento de la fuerza lateral para distintas fuerzas verticales a 20 km/h.

Por otro lado, la velocidad, al igual que la en la primera fase experimental, tiene una ligera influencia sobre la fuerza lateral en comparación con la fuerza vertical, como se muestra en la Figura 7.51. Se muestra, al igual que en la Figura 7.50, que a partir de 6° la adherencia del neumático empieza generalmente a disminuir.

Este hecho, en relación con los datos de deformación del neumático, se ha reflejado ligeramente en las curvas de deformación (por ejemplo, en la Figura 7.22 (a) o Figura 7.24 (a)).

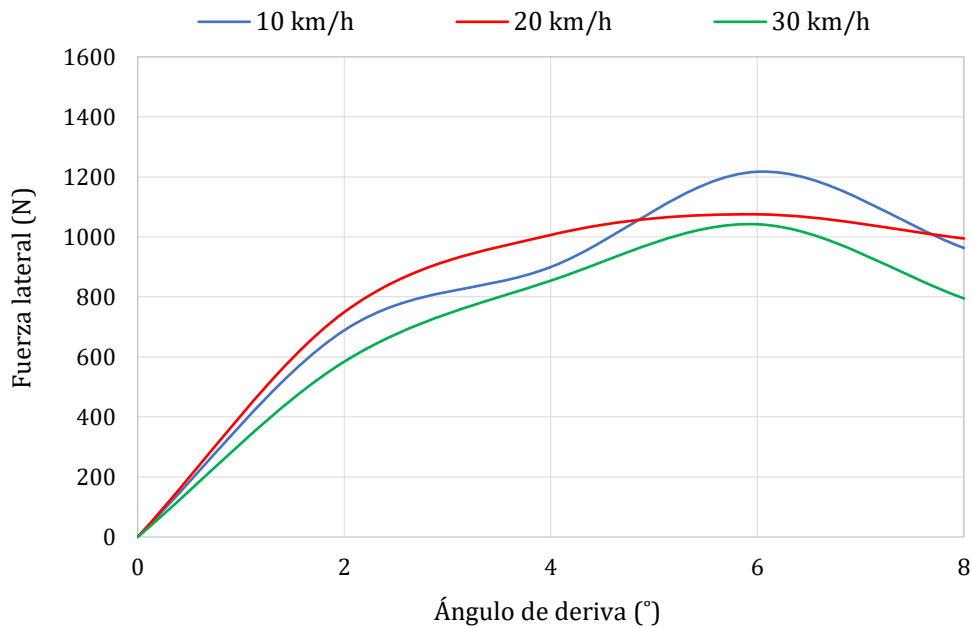


Figura 7.51. Comportamiento de la fuerza lateral para distintas velocidades a 1000 N.

7.2.6 Comportamiento del flanco

Aunque la mayoría de estudios anteriores se han centrado en obtener información del neumático a partir de la deformación de la banda de rodadura, algunas investigaciones han intentado encontrar relaciones entre la deformación del flanco del neumático y las condiciones de trabajo [49], por ello, en la segunda fase experimental llevada a cabo en esta Tesis Doctoral se midió con una banda extensométrica en la parte interior del flanco del neumático para obtener datos de deformación en esta zona.

En general, las curvas muestran un pico máximo de compresión (H) a la entrada de la huella de contacto, a partir de ese punto, la deformación a compresión baja hasta alcanzar un pico máximo de tensión (I), como se muestra en la Figura 7.52.

Cuando el sensor se aleja de la huella de contacto, el neumático se relaja y la deformación disminuye progresivamente hasta un cierto valor del *offset*. El aumento de la velocidad produce un decremento en el pico de máxima compresión; sin embargo, en el punto de contacto las diferencias son mayores, sobre todo entre 10 y 20 km/h. En este punto, la velocidad tiene un efecto contrario, ya que, al aumentar, el pico de máxima deformación a tracción también aumenta.

A pesar del hecho de que la información proveniente del flanco podría ser muy interesante para la estimación de parámetros, se debe puntualizar que cuando el neumático fue ensayado a fuerzas verticales elevadas, es decir, cuando la estructura del flanco (y el sensor) está trabajando a condiciones más exigentes, el sensor dejó de medir correctamente. Este hecho sugiere que las bandas extensométricas instaladas en esa zona con el adhesivo utilizado en esta dirección de medida no tiene un gran potencial, ya que, además, la curvatura de la parte interior del neumático en el flanco aumenta conforme la

fuerza vertical lo hace, por lo que el sensor está sometido cada vez a condiciones más exigentes.

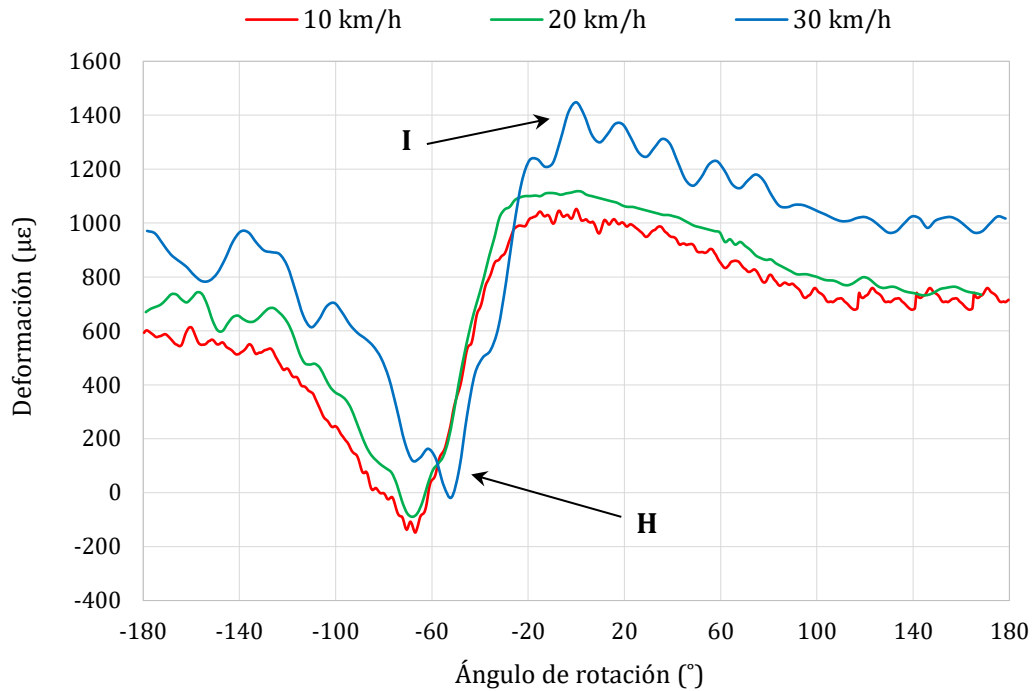


Figura 7.52. Influencia de la velocidad en la deformación del flanco del neumático en el canal 6 a 250 N y 4°.

Por este motivo, y a expensas de probar el comportamiento de las bandas extensométricas dispuestas en el flanco en dirección lateral, no es recomendable utilizar bandas extensométricas en la parte interior de los flancos debido a la baja robustez de las mismas en ese área.

7.3 Conclusiones sobre los puntos de interés

7.3.1 Condiciones de línea recta

En este apartado se evalúa el potencial de los distintos puntos significativos de las curvas de deformación para aportar información sobre las condiciones de trabajo del neumático. Es importante destacar también que las conclusiones mostradas a continuación corresponden a la valoración general de los datos para todas las condiciones de ensayo, y no sólo para las curvas que se han mostrado a lo largo de este documento.

7.3.1.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

En la Tabla 7.1 se muestran las conclusiones extraídas de los ensayos realizados en línea recta, valorando la influencia de las condiciones de trabajo del neumático estudiadas en los puntos significativos de las curvas de deformación (ver Figura 6.3). Como se observa, la información de los canales 1 y 3 es prácticamente equivalente; las variaciones entre ambos canales se deben principalmente a que el neumático muestra cierta asimetría en la curvatura interior y a que pueden existir pequeñas diferencias en la distancia entre el plano medio longitudinal del neumático y los sensores.

En cuanto a la velocidad, el valor del *offset* en los canales laterales es el que aporta una información más repetitiva y clara. Asimismo, la fuerza vertical muestra una influencia muy clara en los valores de deformación máxima a tracción y compresión en los canales laterales y el longitudinal, respectivamente.

Tabla 7.1. Potencial de los puntos significativos en línea recta (primera fase experimental).

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada es clara y fiable en la mayoría de casos.

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada no es lo suficientemente clara.

No existe una relación clara entre la deformación y la condición de trabajo estudiada.

	Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Puntos de interés											
Punto de interés	D	E	F	Offset	B	C	A	Offset	D	E	F	Offset
Influencia de la velocidad												
Influencia de la presión												
Influencia de la fuerza vertical												

Por su parte, la presión es un parámetro cuya variación es difícilmente extraíble a partir de las curvas de deformación en condiciones de línea recta. Sin embargo, es posible que, en condiciones estáticas, la variación de la presión tenga un efecto claro y diferenciable en las curvas de deformación. El análisis de esta hipótesis se plantea como trabajo futuro.

7.3.1.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

Teniendo en cuenta el análisis realizado sobre las curvas de deformación de la segunda fase experimental, se exponen en este apartado las principales conclusiones en cuanto al potencial de los distintos sensores (considerando tanto la posición como la dirección de medida) para la obtención de información sobre las condiciones de trabajo del neumático.

Los puntos significativos de las curvas son los indicados en la Figura 6.3, siendo estos, principalmente, la deformación máxima a la entrada y la salida de la huella de contacto (B y C en dirección longitudinal; D y E en dirección lateral), el punto de máxima deformación en el momento de la pisada (A en dirección longitudinal, F en dirección lateral), y el *offset*.

En la Tabla 7.2 se muestran las conclusiones extraídas en los ensayos realizados en línea recta, valorando la influencia de las condiciones de trabajo del neumático cuando éste está rodando con un ángulo de caída. Como se observa, los canales 1 y 2, que miden en dirección longitudinal, proporcionan información equivalente acerca de la velocidad y la fuerza vertical a la entrada y salida de la huella de contacto. Sin embargo, el canal 1 muestra datos más repetitivos y que guardan una relación aproximadamente lineal en cuanto a la influencia de la velocidad en el valor del *offset*.

Por otro lado, la señal deformación medida por los canales 3 y 4 guarda una relación muy similar con la variación de la velocidad, pero no en cuanto a la variación de la fuerza vertical.

Los picos de deformación del canal 4 muestra una tendencia más lineal que parabólica con la variación de este parámetro, mientras que el canal 3 no proporciona datos tan claros en estos puntos.

Tabla 7.2. Potencial de los puntos significativos en línea recta (segunda fase experimental).

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada es clara y fiable en la mayoría de casos.

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada no es lo suficientemente clara.

No existe una relación clara entre la deformación y la condición de trabajo estudiada.

	Canal 1				Canal 2				Canal 3				Canal 4			
	Puntos de interés															
	D	E	F	Offset	D	E	F	Offset	B	C	A	Offset	B	C	A	Offset
Influencia velocidad																
Influencia fuerza vertical																

Por tanto, se puede concluir que, generalmente, los canales 1 y 2 son los que podrían proporcionar mayor información sobre las condiciones de trabajo del neumático. Sin embargo, teniendo en cuenta que el canal 4 proporciona información clara sobre la fuerza vertical aplicada en los puntos de máxima deformación a tracción y a compresión, se puede decir los canales situados en la parte más alejada del plano medio longitudinal (más próximos a los hombros del neumático) son los más interesantes para el desarrollo del neumático inteligente.

7.3.2 Condiciones de paso por curva

7.3.2.1 Primera fase experimental: neumático tipo I

Haciendo un análisis de los datos de deformación en dirección lateral, se observa que el comportamiento entre los picos de máxima tensión al comienzo y al final de la huella de contacto muestra diferencias mayores en el canal 3 que en el canal 1, como se indica en la Tabla 7.3.

Tabla 7.3. Potencial de los puntos significativos en condiciones de curva (primera fase experimental).

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada es clara y fiable en la mayoría de casos.

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada no es lo suficientemente clara.

No existe una relación clara entre la deformación y la condición de trabajo estudiada.

	Canal 1				Canal 2				Canal 3			
	Puntos de interés											
	D	E	F	Offset	B	C	A	Offset	D	E	F	Offset
Influencia del ángulo de deriva												
Influencia de la velocidad												
Influencia de la presión												
Influencia de la fuerza vertical												

Esto es debido a la posición de las bandas extensométricas y al hecho de que una esté en la zona exterior del neumático y otra en el interior en el paso por curva (ver Figura 7.19). Esto induce un par de fuerzas en la huella de contacto que genera deformaciones diferentes a ambos lados de la línea media de la huella de contacto. A pesar de presentar variaciones de menor amplitud, en términos numéricos, las deformaciones medidas en dirección lateral tienen un gran potencial de análisis, pero, en términos de estimación de parámetros, la variación de los picos máximos de deformación a tracción es más interesante en el canal 3 que en el 1.

Así mismo, en dirección longitudinal las curvas muestran información muy clara para la mayoría de las condiciones de trabajo. Especialmente para la variación de la fuerza vertical y la velocidad, cuyo efecto se ve de forma especialmente clara en los valores del *offset*.

7.3.2.2 Segunda fase experimental: neumático tipo II

En condiciones de paso por curva, el análisis se centra principalmente en la influencia del ángulo de deriva en las curvas de deformación, estudiando la influencia de este parámetro en combinación con la fuerza vertical y la velocidad.

Los canales 1 y 5, situados en lados opuestos del plano medio longitudinal, proporcionan información similar en la mayoría de puntos significativos a excepción del *offset*, donde el canal 5, colocado en la parte más cargada de la banda de rodadura, proporciona información más clara sobre la influencia del ángulo de deriva en los datos de deformación.

Además, cabe señalar que el canal 1, a pesar de mostrar datos que guardan buena relación con las condiciones de trabajo del neumático en el punto de máxima deformación a compresión (F), se ha marcado en color rojo debido a que, a priori, cuando el neumático esté virando hacia el lado opuesto a fuerzas verticales bajas, la señal de deformación mostrará un pico de deformación a tracción en lugar de a compresión, dificultando la obtención de información a partir de ese canal (ver Figura 7.38 y Figura 7.22 (b)).

Tabla 7.4. Potencial de los puntos significativos en condiciones de paso por curva (segunda fase experimental).

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada es clara y fiable en la mayoría de casos.

La relación entre la deformación y la condición de trabajo estudiada no es lo suficientemente clara.

No existe una relación clara entre la deformación y la condición de trabajo estudiada.

	Canal 1				Canal 3				Canal 4				Canal 5			
	Puntos de interés															
	D	E	F	Offset	B	C	A	Offset	B	C	A	Offset	D	E	F	Offset
Influencia ángulo de deriva																
Influencia velocidad																
Influencia fuerza vertical																

Los canales 3 y 4, por su parte, muestran información muy diferente. El canal 4, además de mostrar mayor repetitividad en la señal de deformación, recoge datos con una

relación aproximadamente lineal en cuanto a la influencia del ángulo de deriva y la fuerza vertical, especialmente en los puntos máximos de deformación a compresión a la entrada y salida de la huella de contacto.

Como conclusión, los canales 4 y 5, dispuestos en dirección longitudinal y lateral, proporcionan datos de deformación que guardan mayor relación con las condiciones de trabajo estudiadas. Teniendo en cuenta que ambos están situados en la parte más cercana a los hombros del neumático, que ambos trabajan en el lado sobrecargado de la banda de rodadura, y que en línea recta también son los canales cercanos a los hombros los que proporcionan mejor información, se puede concluir que, en conjunto, los canales cercanos a los hombros y que trabajan sometidos a mayor fuerza vertical proporcionan la información más útil

Capítulo 8

Sistema de detección del deslizamiento lateral

El neumático inteligente, por su propia concepción, tiene entre sus objetivos no sólo la capacidad de adquirir información (sea cual sea el tipo de sensor utilizado y la magnitud de medida del mismo), sino también ser capaz de trabajar con los datos adquiridos para transformarlos en información útil para los sistemas de control activo del vehículo y los propios conductores.

Por eso, en este capítulo se sientan las bases de un método de estimación de parámetros del neumático a partir de los datos de deformación recogidos en la primera fase experimental. El trabajo se divide en dos etapas, una para los datos en condiciones de línea recta, donde se estiman la velocidad y la fuerza vertical, y otra para los datos en condiciones de paso por curva, donde se estiman el ángulo de deriva y la fuerza vertical.

En la última sección, se utilizan las estimaciones logradas del ángulo de deriva y la fuerza vertical para realizar un cálculo estimado del coeficiente de fricción lateral solicitado (LFC, *Lateral Friction Coefficient*) mediante un modelo obtenido experimentalmente a partir de las curvas de fuerza lateral y de los datos de deformación. Este sistema, capaz de detectar en fase temprana que el neumático no está trabajando al límite de adhesión, se ha denominado *Slip Detection System* (SDS).

8.1 Metodología

A partir del análisis de las curvas experimentales y de la selección de puntos significativos para la determinación de parámetros dinámicos característicos del neumático, se propone el uso de técnicas de estimación para la obtención de resultados aplicables en condiciones reales de funcionamiento. Para este paso se han analizado diferentes técnicas de estimación, seleccionando la técnica de lógica difusa por sus buenos resultados en estudios anteriores [82]. En este apartado, se da una visión genérica del entorno de trabajo del sistema que se ha utilizado en la presente Tesis Doctoral: la lógica difusa o *Fuzzy Logic*.

La lógica difusa es una metodología que hace posible un proceso de toma de decisiones basado en unos parámetros iniciales, de forma similar a la forma en que lo haría la mente humana. El marco de trabajo en lógica difusa se construye virtualmente con MATLAB® a partir de la herramienta de *Fuzzy Logic*, y es implementada en el entorno de simulación Simulink. Los resultados de la simulación se utilizarán para demostrar cómo de factible es esta herramienta “lógica” para estimar la fuerza vertical y la velocidad de rotación

a partir de los datos de deformación cuando el ángulo de deriva es 0° , y la fuerza vertical y el ángulo de deriva cuando éste es distinto de 0° .

En la lógica difusa, las variables de entrada son relacionadas con conjuntos de fronteras, comúnmente denominados “conjuntos borrosos”. En ellos, se define una región con bordes definidos, a los cuales puede pertenecer o no el valor de una variable. Los conjuntos borrosos son una extensión de la teoría de conjuntos, donde se añade una función de pertenencia, definida como un número real entre 0 y 1. Así, se introduce el concepto de conjunto o subconjunto borroso y se le asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta. Por cada conjunto se define una función de pertenencia denominada $\mu_A(x)$, que indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), si esta función toma el valor 0 significa que tal valor de x no está incluido en A , y si toma el valor de 1 el correspondiente valor de x está absolutamente incluido en A . De este modo, sea X una colección de objetos, expresados de forma genérica por x , entonces un conjunto difuso A en X , se define como un conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\}$$

Donde $\mu_A(x)$ es una función de pertenencia cuya etiqueta es A y su dominio es x .

En la Figura 8.1 se representa esquemáticamente el sistema de trabajo de la lógica difusa, que se divide comúnmente en cuatro etapas, siendo la más importante la parte central, en la que el Sistema Interferencial de Lógica Difusa (FIS) deduce los valores de salida basándose en los valores de entrada.

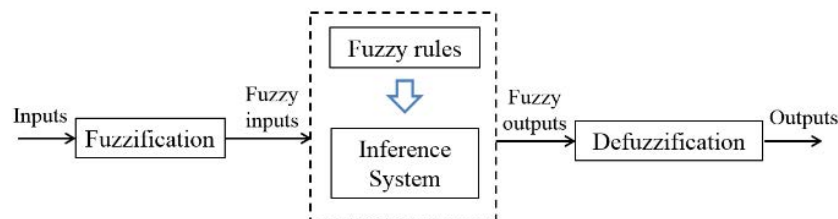


Figura 8.1. Esquema de un sistema *Fuzzy Logic*.

Existen principalmente dos tipos de inferencia: modelo de Mamdani y de TSK (Takagi, Sugeno y Kang). En este trabajo se ha utilizado la inferencia de Mamdani al ser el método más ampliamente utilizado en este tipo de aplicaciones. Las etapas en las que se divide este método son las siguientes:

- **Fuzzificación**

En esta etapa se toman los datos de entrada y se determina el grado de pertenencia a cada conjunto borroso mediante las funciones de pertenencia. La conversión de los datos de entrada a valores lingüísticos expresa la proporción de la similitud del dato a cada término lingüístico de la variable.

- **Definición de las reglas**

En esta etapa se deben definir las reglas lingüísticas de control que realizarán la toma de decisiones, que a su vez decidirán la forma en la que debe actuar el sistema.

El método Mamdani utiliza reglas tipo *if→then*, que describen las salidas del sistema en respuesta a varias entradas. Una regla del conjunto de reglas consta de dos partes, el

antecedente y la consecuencia, pudiendo ser varios los antecedentes (entradas) y las consecuencias (salidas), siendo más difícil la estimación cuanto menor sea el número de entradas y mayor sea el número de salidas. A modo de ejemplo, la sintaxis de las reglas es la siguiente:

“if Antecedente 1 and Antecedente 2.... then Consecuencia 1 and Consecuencia 2...”

Las reglas siguen el sentido común del comportamiento del sistema y son escritos en términos de las etiquetas (valores lingüísticos) de las funciones de pertenencia. En este caso, los antecedentes corresponden a variables como la presión o los puntos significativos de las curvas de deformación de la banda de rodadura del neumático, mientras que las consecuencias corresponden a variables que afectan al comportamiento del neumático, como la fuerza vertical o el ángulo de deriva.

Finalmente, el resultado de la evaluación del antecedente se aplica al consecuente, aplicando un recorte o escalado según el valor de verdad del antecedente. El método más comúnmente utilizado es el recorte, que corta el consecuente con el valor de verdad del antecedente, como se muestra en la Figura 8.2. El escalado proporciona un valor más preciso, preservando la forma original del conjunto difuso. Se obtiene multiplicando todos los valores por el valor de verdad del antecedente.

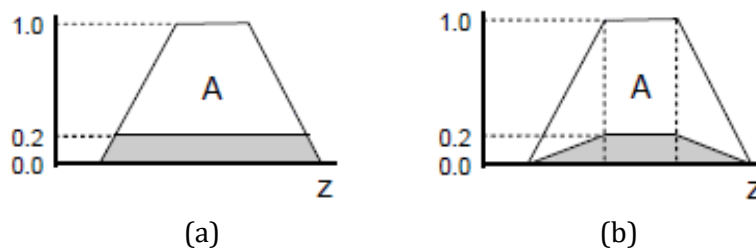


Figura 8.2. (a) Conjunto recortado, (b) conjunto escalado [83].

Finalmente, se produce el proceso de agregación de las salidas, en el cual se unifican las salidas de todas las reglas, es decir, se combinan las funciones de pertenencia de todos los consecuentes previamente recortados o escalados, combinándolos para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida.

- Inferencia difusa

Las reglas difusas representan el conocimiento y la estrategia de control, pero cuando se asigna información específica a las variables de entrada en el antecedente, la inferencia difusa es necesaria para calcular el resultado de las variables de salida del consecuente, este resultado es en términos difusos, es decir, se obtiene un conjunto difuso de salida de cada regla, que posteriormente, junto con las demás salidas de reglas, servirán para obtener la salida del sistema.

Existe una gran cantidad de métodos de inferencia difusa, pero hay cuatro que generan mejores resultados en el campo del control [81,83], estos son inferencia de Mamdani por mínimos (*“Mamdani minimum inference”*), RM, la inferencia del producto de Larsen (*“Larsen product inference”*), RL, la inferencia del producto drástico (*“Drastic product inference”*) RDP y la inferencia del producto limitado (*“Bounded product inference”*), RBP.

En este trabajo particular se utiliza la interferencia Mamdani, en la que las entradas son primero “fuzzificadas” usando funciones de correspondencia o reglas, en las cuales se basa el sistema para la toma de decisiones.

Este operador puede expresarse matemáticamente según la Ec. 12:

$$(\mu_A(x), \mu_B(y)) = \mu_A(x) \mu_B(y) \quad \text{Ec. 12}$$

Para entender cómo funciona, se asume que X (el eje horizontal en la Figura 8.3, ya sean entradas o salidas) es un espacio de puntos y el elemento genérico de X es denominado x ($X = \{x\}$) (ver Figura 8.3). Una función de correspondencia $f_A(X)$ caracteriza un conjunto difuso de A en X en el que cada punto en X es un número real del intervalo $[0, 1]$ y los valores de $f_A(X)$ en x representan el grado de pertenencia de x en A. Si el valor $f_A(X)$ es cercano a 1, significa que x tiene un alto grado de pertenencia en A. Finalmente, $\mu_A(x)$ indica la función de pertenencia de x.

Existe una gran variedad de formas para las funciones de pertenencia, las más comunes son de tipo trapezoidal, triangular, singleton, etc. Por simplicidad, este estudio usa funciones de correspondencia triangulares. La distribución puede expresarse matemáticamente como se muestra en la Figura 8.3.

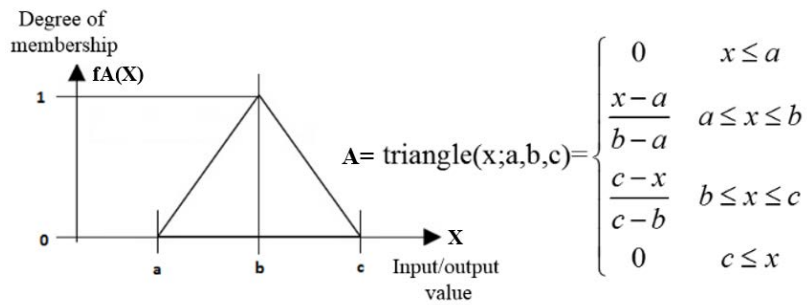


Figura 8.3. Las funciones de pertenencia para una variable genérica.

- Defuzzificación

Una vez que las funciones que fijan el grado de pertenencia se han definido, las entradas “fuzzificadas” son combinadas de acuerdo a las reglas de la lógica difusa. Dado que cada valor, ya sea de las entradas o de las salidas, tiene un grado de pertenencia a cada una de las categorías, la respuesta es automáticamente determinada dependiendo de este valor, durante el proceso de desfuzzificación.

Aunque existen varios métodos para realizar la desfuzzificación, como el método de la media ponderada y el método Singleton, en este trabajo se ha utilizado el método del “Centro de Gravedad o Centroide”, en el cual se determina el centro de gravedad del conjunto de salida, resultante de la unión de las contribuciones de todas las reglas válidas, siendo el valor de salida la abscisa del punto del centro de gravedad el calculado según la Ec. 13:

$$z^* = \frac{\int \mu_i(z) \cdot z \cdot dz}{\int \mu_i(z) \cdot dz} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde $\mu_i(z)$ es la función de pertenencia agregada y z es la variable de salida. Con el método de desfuzzificación del centroide se transforma la salida difusa en un número real.

En la Figura 8.4 se resume el proceso de inferencia difusa.

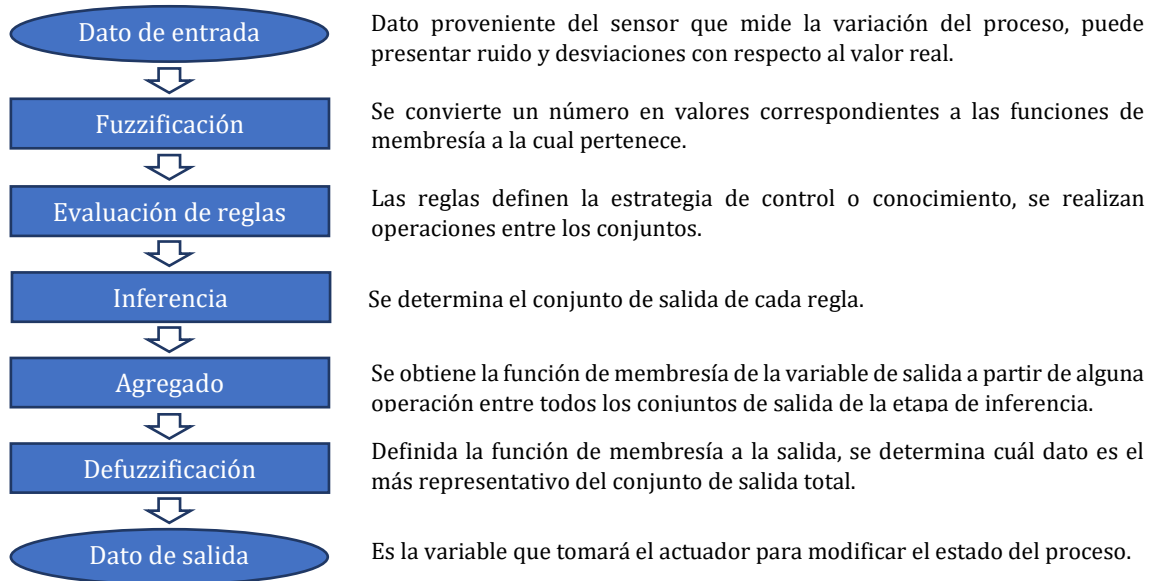


Figura 8.4. Etapas para la toma de decisiones en *Fuzzy Logic*.

8.2 Condiciones de línea recta

En este apartado se detalla el proceso de trabajo seguido para conseguir estimaciones precisas de dos variables simultáneamente: velocidad de giro y fuerza vertical. Asimismo, es posible estimar correctamente la presión, pero en condiciones concretas y no simultáneamente con las otras dos variables, tal y como se comentará más adelante.

En este trabajo particular, la técnica de lógica difusa se ha utilizado para estimar la fuerza vertical y la velocidad de rodadura. Como es bien conocido, cuando aumenta la transferencia de cargas, la adherencia efectiva se ve reducida [84]. Por este motivo, toda la información que se pueda obtener sobre el proceso de transferencia de cargas longitudinal y/o lateral en el vehículo, proporciona información necesaria para estimar adecuadamente la adherencia solicitada y la adherencia potencial en cada instante.

Además, el sistema de lógica difusa desarrollado sirve para probar la utilidad de esta herramienta para estimar condiciones de trabajo del neumático a partir de los datos de deformación.

8.2.1 Estimación de la velocidad y la fuerza vertical

Para el proceso de fuzzificación (ver Figura 8.1) se han considerado tres entradas que corresponden a puntos significativos de las curvas de deformación el canal 3: los picos de valor máximo de deformación a tracción al comienzo y final del área de contacto, (entradas 1 y 2, respectivamente) y los valores de *offset* registrados lejos de la huella de contacto (entrada 3), que se indican en la Figura 6.3. Como se ha podido comprobar, el valor de *offset* solamente varía significativamente con la velocidad (ver Tabla 7.1) en comparación con la presión y la fuerza vertical, por lo que se han utilizado estos valores como entrada del sistema de lógica difusa para estimar con mayor fiabilidad la velocidad de rodadura. Como se indicó anteriormente, la velocidad de rotación puede además ser determinada a través del periodo de la curva (ver Figura 7.3). Sin embargo, dado que esta estrategia de análisis

es fuertemente dependiente de la resolución y la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición de datos, se ha considerado más adecuado utilizar los valores de *offset* para la estimación de la velocidad.

Por lo tanto, y para concretar, los parámetros a estimar (salidas) serán la velocidad de rotación (salida 1) y la fuerza vertical (salida 2), mientras que las entradas son los datos de deformaciones ya indicados (valores máximos a tracción y el valor de *offset* obtenidos con el canal 3). La Figura 8.5 (a) muestra esquemáticamente la interfaz de la herramienta de lógica difusa, así como las entradas y salidas que se han tenido en cuenta.

Finalmente, es necesario indicar que, a pesar de que la presión de inflado puede ser estimada en base a los datos de deformación, también puede ser medida correctamente y de forma directa por un sistema TPMS. Por este motivo, la presión no se ha considerado prioritaria para la realización de estimaciones. Por otra parte, esta decisión se debe fundamentalmente a la pérdida de precisión observada cuando se intentó estimar simultáneamente la presión, la fuerza vertical y la velocidad de giro. Tras múltiples pruebas se decidió tomar la presión como parámetro conocido, de modo que se definieron tres bloques de lógica difusa, que se han desarrollado para presiones de inflado de 0,8, 1 y 1,2 bar. Esta propuesta ha resultado ser la más precisa y la que mejores tiempos de ejecución ha permitido obtener, si bien es cierto que la optimización para su aplicación en tiempo real no ha sido abordada de forma específica.

Por otra parte, se ha estudiado también la posibilidad de estimar la presión cuando se tiene un ángulo de volante nulo y aceleraciones longitudinales y laterales inferiores a un cierto valor (0,1g), para actualizar su valor en condiciones de baja sollicitación dinámica y utilizar dicho valor actualizado periódicamente en el programa de *Fuzzy Logic* propuesto. Así pues, el sistema partiría siempre de un valor por defecto, en este caso 1 bar por ser la presión nominal del neumático usado en este estudio, y estimaría periódicamente un valor más preciso de la presión de inflado para alimentar de un modo más actualizado la herramienta de estimación de las otras dos variables. Para esta estrategia de cálculo se supone que la presión de inflado no cambia entre medidas (realizadas cada cierto tiempo y en regímenes estacionarios), a no ser que se produzca un pinchazo. Así pues, el bloque correspondiente de *Fuzzy Logic*, indicado en la Figura 8.5 (b), puede usarse a partir de la estimación de presión previa.

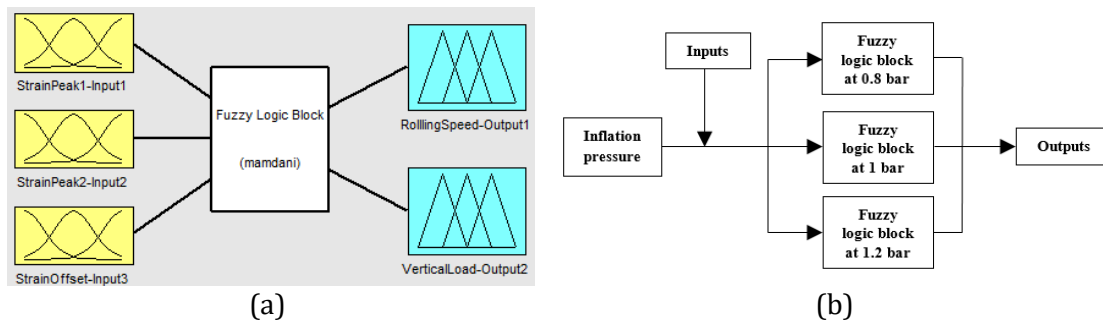


Figura 8.5. (a) Interfaz de la herramienta de lógica difusa; (b) esquema de trabajo seguido para obtener las salidas.

Como se puede deducir, la definición de las reglas de lógica difusa entre las variables de entrada y de salida, así como las funciones de pertenencia, son de gran importancia para el desarrollo de los bloques de lógica difusa. Las reglas usadas definen la relación entre las variables de entrada y de salida, indicando la forma en la que la fuerza vertical se comporta. Para cada *Fuzzy Logic Block* se han usado 232 reglas del tipo “*if→then*” como las siguientes:

if (input 1 is I1 and input 2 is I2)
and input 3 is I3

then (output 1 is O1 and output 2 is O2)

Donde I1 es la deformación máxima a la salida de la huella de contacto en sentido lateral, I2 es la deformación máxima a la entrada de la huella de contacto en sentido lateral, I3 es el valor del *offset* en sentido longitudinal, O1 y O2 son valores de estas variables (fuerza vertical y velocidad de rotación, respectivamente).

En la Figura 8.6 (a) se muestra la sintaxis de las reglas utilizadas para la estimación de la fuerza vertical, mientras que en la Figura 8.6 (b) se muestran las utilizadas para estimar la velocidad.

1. If (StrainOut is 300/325) and (StrainIn is 550/575) then (Load is 250/300) (1)
2. If (StrainOut is 325/350) and (StrainIn is 575/600) then (Load is 250/300) (1)
3. If (StrainOut is 350/375) and (StrainIn is 600/625) then (Load is 250/300) (1)
4. If (StrainOut is 375/400) and (StrainIn is 625/650) then (Load is 250/300) (1)
5. If (StrainOut is 400/425) and (StrainIn is 650/675) then (Load is 300/350) (1)
6. If (StrainOut is 425/450) and (StrainIn is 675/700) then (Load is 300/350) (1)
7. If (StrainOut is 450/475) and (StrainIn is 700/725) then (Load is 300/350) (1)
8. If (StrainOut is 475/500) and (StrainIn is 725/750) then (Load is 350/400) (1)
9. If (StrainOut is 500/525) and (StrainIn is 750/775) then (Load is 350/400) (1)
10. If (StrainOut is 525/550) and (StrainIn is 775/800) then (Load is 350/400) (1)
11. If (StrainOut is 550/575) and (StrainIn is 800/825) then (Load is 400/450) (1)
12. If (StrainOut is 575/600) and (StrainIn is 825/850) then (Load is 400/450) (1)
13. If (StrainOut is 600/625) and (StrainIn is 850/875) then (Load is 400/450) (1)
14. If (StrainOut is 625/650) and (StrainIn is 875/900) then (Load is 450/500) (1)
15. If (StrainOut is 650/675) and (StrainIn is 900/925) then (Load is 450/500) (1)
16. If (StrainOut is 675/700) and (StrainIn is 925/950) then (Load is 450/500) (1)
17. If (StrainOut is 700/725) and (StrainIn is 950/975) then (Load is 500/550) (1)
18. If (StrainOut is 725/750) and (StrainIn is 975/1000) then (Load is 500/550) (1)
19. If (StrainOut is 750/775) and (StrainIn is 1000/1025) then (Load is 500/550) (1)
20. If (StrainOut is 775/800) and (StrainIn is 1025/1050) then (Load is 550/600) (1)

(a)

212. If (StrainOffset is -75/-50) then (Speed is 10) (1)
213. If (StrainOffset is -75/-50) then (Speed is 12) (1)
214. If (StrainOffset is -75/-50) then (Speed is 14) (1)
215. If (StrainOffset is -100/-75) then (Speed is 16) (1)
216. If (StrainOffset is -100/-75) then (Speed is 18) (1)
217. If (StrainOffset is -125/-100) then (Speed is 20) (1)
218. If (StrainOffset is -125/-100) then (Speed is 22) (1)
219. If (StrainOffset is -125/-100) then (Speed is 24) (1)
220. If (StrainOffset is -150/-125) then (Speed is 26) (1)
221. If (StrainOffset is -150/-125) then (Speed is 28) (1)
222. If (StrainOffset is -175/-150) then (Speed is 30) (1)
223. If (StrainOffset is -175/-150) then (Speed is 32) (1)
224. If (StrainOffset is -200/-175) then (Speed is 34) (1)
225. If (StrainOffset is -200/-175) then (Speed is 36) (1)
226. If (StrainOffset is -225/-200) then (Speed is 38) (1)
227. If (StrainOffset is -300/-275) then (Speed is 40) (1)
228. If (StrainOffset is -325/-300) then (Speed is 42) (1)
229. If (StrainOffset is -325/-300) then (Speed is 44) (1)
230. If (StrainOffset is -350/-325) then (Speed is 46) (1)
231. If (StrainOffset is -350/-325) then (Speed is 48) (1)
232. If (StrainOffset is -425/-400) then (Speed is 50) (1)

(b)

Figura 8.6. (a) Set de reglas para estimar la fuerza vertical; (b) set de reglas para estimar la velocidad.

Se observa que para la estimación de la fuerza vertical se han utilizado fundamentalmente los picos de deformación a la entrada y salida de la huella de contacto, mientras que para la estimación de la velocidad se ha utilizado el valor de *offset*, todos ellos obtenidos a partir del canal 3. Además, cabe destacar que para la estimación de la fuerza vertical se han utilizado dos entradas, mientras que la velocidad ha sido estimada únicamente con una (el valor del *offset*), haciendo un total de tres entradas y dos salidas.

Como se muestra en la Figura 8.7, se han usado funciones triangulares. A modo de ejemplo, se muestra la forma en que la velocidad se divide en 21 niveles desde 0 a 55 km/h.

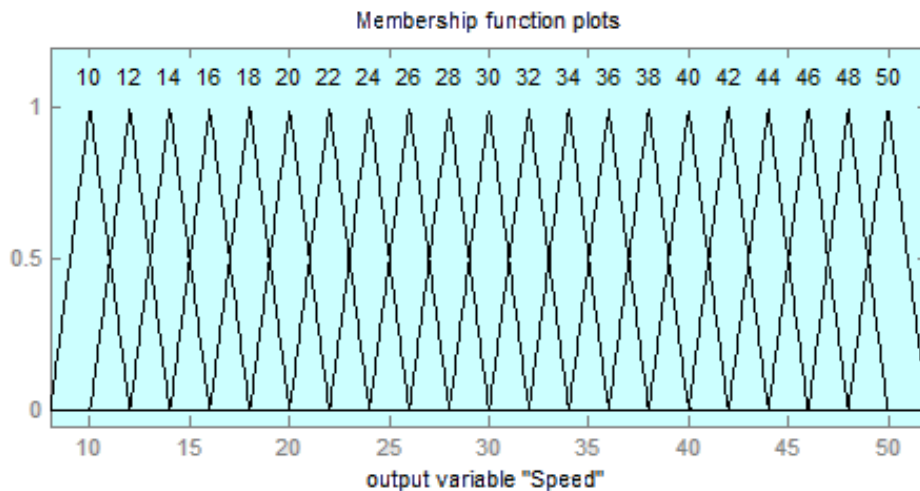


Figura 8.7. Funciones de pertenencia de la velocidad experimental para la variable de salida “velocidad”.

Los conjuntos difusos para la variable “velocidad” se han asignado a etiquetas lingüísticas del tipo 20, 22, 24, etc., que corresponden a la velocidad en km/h para el valor de pertenencia igual a 1, con un rango de 4 km/h para cada conjunto. Por ejemplo, la etiqueta lingüística 46 abarca un rango desde 44 hasta 48.

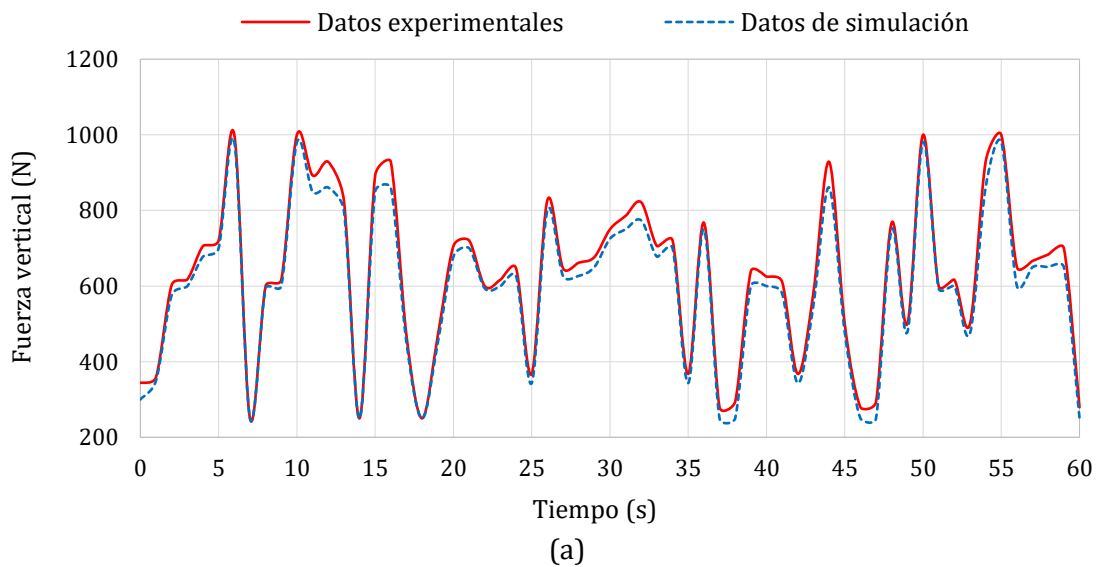
La Tabla 8.1 resume el número de niveles en los que cada variable de cada *Fuzzy Logic Block* se divide y el rango que estas cubren para el conjunto difuso completo (es decir, considerando todas las funciones triangulares) como se muestra en la Figura 8.7.

Tabla 8.1. Número de niveles y rango de cada variable.

	Presión	Input 1	Input 2	Input 3	Output 1	Output 2
Niveles	0,8 bar	60	44	15	16	21
	1 bar	56	41	15	16	21
	1,2 bar	54	37	17	16	21
Rango	0,8 bar	275 a 1800 $\mu\epsilon$	-75 a 1050 $\mu\epsilon$	-450 a 50 $\mu\epsilon$	5 a 55 km/h	200 a 1050 N
	1 bar	175 a 1600 $\mu\epsilon$	-100 a 950 $\mu\epsilon$	-450 a -50 $\mu\epsilon$	5 a 55 km/h	200 a 1050 N
	1,2 bar	150 a 1525 $\mu\epsilon$	-100 a 825 $\mu\epsilon$	-450 a 0 $\mu\epsilon$	5 a 55 km/h	200 a 1050 N

8.2.2 Resultados de estimación y validación

En esta sección, se muestran los resultados obtenidos a partir de la herramienta de lógica difusa comparados con los datos experimentales a diferentes presiones de inflado. Antes de mostrar los resultados es importante señalar que, tal y como se ha indicado con anterioridad, los ensayos experimentales se han realizado con fuerzas verticales cada 250 N y velocidades cada 10 km/h. Debido a esto, para comparar resultados de simulaciones con valores experimentales intermedios y determinar si mantienen una buena correlación con éstos, se usan valores intermedios a través de cálculos con curvas de regresión. De este modo, se han realizado diferentes simulaciones no solo con datos experimentales sino con datos intermedios.



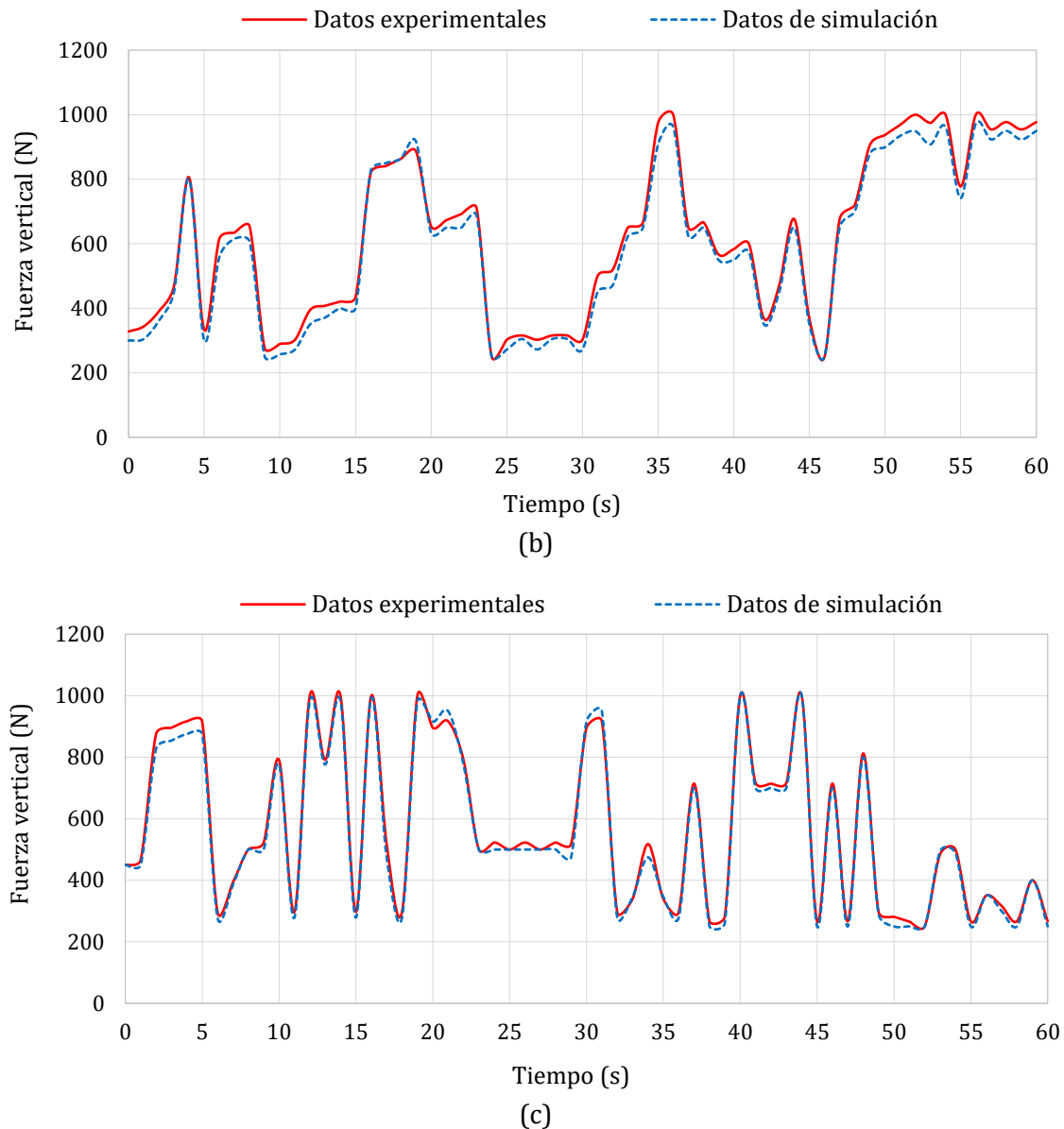


Figura 8.8. Resultados de simulaciones de fuerza vertical para (a) 0,8 bar, (b) 1 bar y (c) 1,2 bar.

Tal y como puede observarse, las simulaciones realizadas a partir de los valores estimados y los datos experimentales arrojan valores muy similares. A lo largo de todas las simulaciones realizadas, el error medio ha sido de un 6% a 0,8 bar, 6,2% a 1 bar y 3,15% a 1,2 bar. Sin embargo, es necesario indicar que el error medio se reduce considerablemente cuando se considera únicamente el conjunto de datos experimentales, sin incluir valores intermedios obtenidos mediante regresión. Como resultado, las curvas del modelo y de los experimentos prácticamente se solapan. Es por tanto necesario realizar un mayor número de ensayos, para más velocidades y fuerzas verticales dentro de los rangos estudiados, para conseguir mejores estimaciones y un funcionamiento óptimo de este sistema dentro de un neumático inteligente real.

En cuanto a los resultados de las simulaciones para velocidad de rodadura, los resultados muestran una diferencia de menos de 2 km/h para cualquier presión de inflado, mientras que el error medio se reduce a la mitad, inferior a un 3% en cualquier situación, para el conjunto de datos experimentales obtenidos. La Figura 8.9 muestra los resultados de las simulaciones para diferentes presiones de inflado.

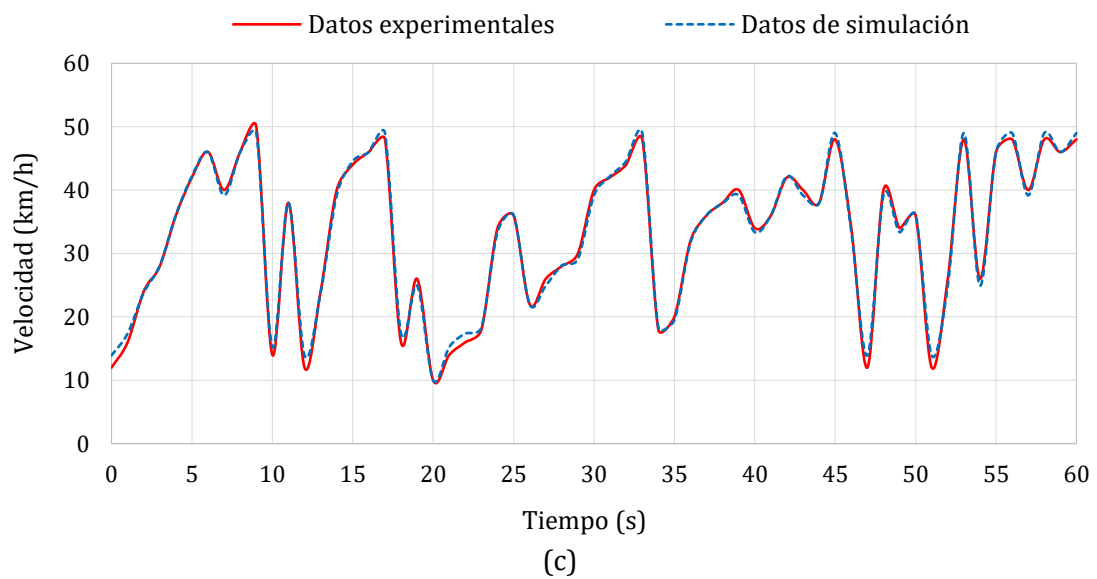
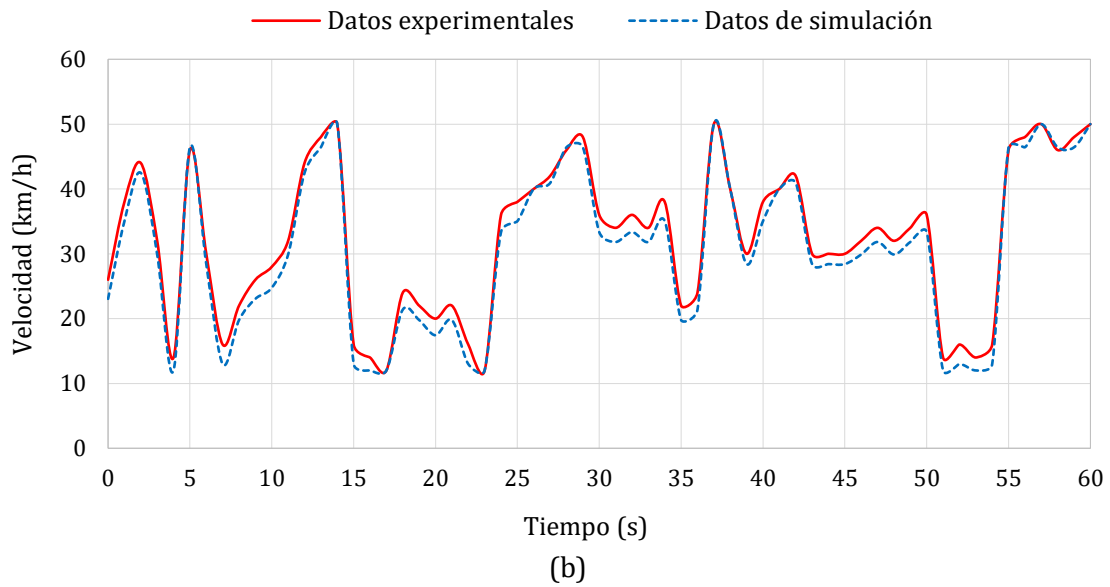
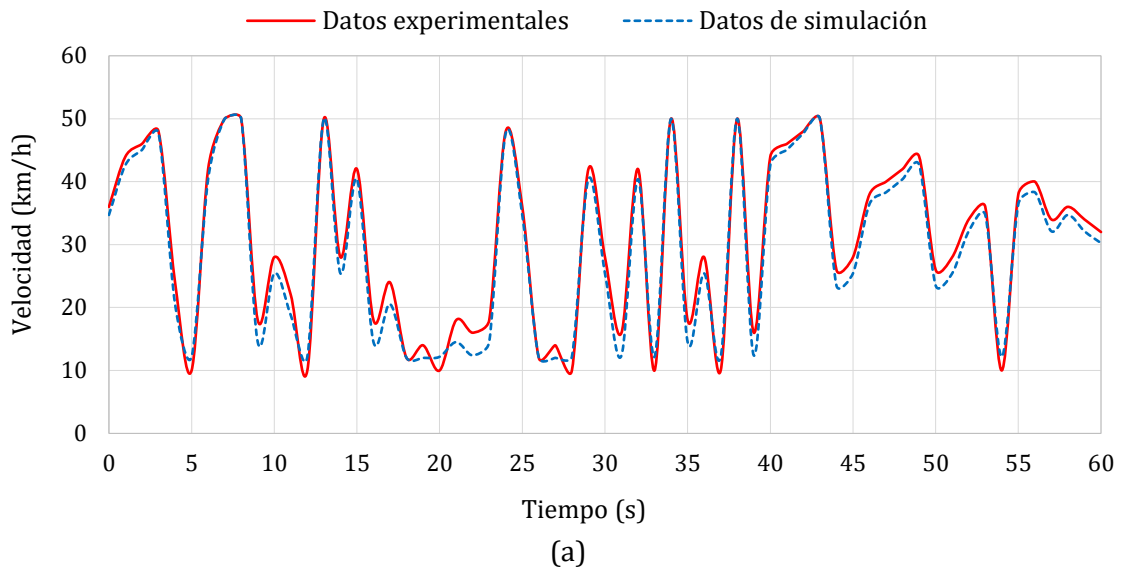


Figura 8.9. Resultados de simulaciones de velocidad de giro para (a) 0,8 bar, (b) 1 bar y (c) 1,2 bar.

Como se puede observar, las curvas prácticamente se solapan, especialmente a 1,2 bar de presión. Por tanto, se puede afirmar que el método basado en lógica difusa permite estimar con gran precisión la velocidad de giro de la rueda en cualquier instante. Es necesario destacar que la variación en el tiempo indicada en el eje x (ver Figura 8.8 y Figura 8.9) corresponde a tiempo de simulación y no es una escala de tiempo real. Además, la velocidad y la fuerza vertical se han estimado teniendo en cuenta los datos experimentales de deformación, siendo éstos medidos en condiciones de régimen permanente o baja velocidad de variación, sin aceleraciones ni frenadas severas, ya que el equipo de ensayo no permitió evaluar este tipo de situaciones dinámicas.

Por último, cabe indicar que, en base a la información obtenida por deformación, si un neumático gira a una velocidad muy diferente a los otros neumáticos del vehículo, se puede deducir que la rueda está deslizando y ha de controlarse el par de frenada o de tracción que se aplica en dicha rueda. Del mismo modo, si la fuerza vertical sobre una rueda es anormalmente baja podría estar causada por una pérdida de contacto con el suelo. Esta información puede ser usada para activar los sistemas de ABS o TCS y gestionar de un mejor modo las fuerzas que se desean transmitir en el contacto neumático-suelo. Por otra parte, la información obtenida sobre la fuerza vertical unida a los valores de las aceleraciones longitudinales y laterales del vehículo y las dimensiones del mismo, puede ser muy útil para estimar muchos otros parámetros del comportamiento dinámico del vehículo como el coeficiente de adherencia solicitada o la transferencia de cargas.

8.3 Condiciones de paso por curva

Al igual que sucede con el análisis realizado para los parámetros en rodadura en línea recta, en este capítulo se realizan estimaciones mediante la aplicación de lógica difusa. Más concretamente, se analizan las posibilidades de estimación del ángulo de deslizamiento y la fuerza vertical utilizando la experiencia previa del sistema de lógica difusa desarrollado para condiciones de línea recta. En este caso, se han optimizado las funciones de pertenencia para utilizar el mínimo número de reglas posible. Es necesario indicar que también se ha estudiado la posibilidad de estimar simultáneamente la presión de inflado y la velocidad de giro de la rueda, además de las variables indicadas. Sin embargo, la estimación de los cuatro parámetros simultáneamente da como resultado una pérdida de precisión muy elevada (diferencias superiores al 10% al compararlo con datos experimentales) en la estimación del ángulo de deriva. Esto ha llevado a descartar esta opción, ya que la correcta estimación del ángulo de deriva puede llegar a ser una herramienta fundamental para trabajar con sistemas de control de estabilidad. Por otra parte, tanto la velocidad angular de la rueda como su presión de inflado pueden obtenerse mediante equipos de medida externos a la rueda, estando bastante extendido el uso de este tipo de equipos en la actualidad. Esto ha llevado a priorizar en el proceso de estimación y seleccionar el ángulo de deslizamiento y la fuerza vertical como parámetros con mayor potencial en un neumático inteligente.

Asimismo, a partir de estos resultados para rodadura en curva, se ha propuesto una estrategia de estimación para obtener el coeficiente de adherencia lateral solicitado en el contacto neumático-calzada en cada instante.

8.3.1 Estimación del ángulo de deriva y la fuerza vertical

Como es bien sabido, cuanto mayor es la transferencia de carga entre neumáticos en una maniobra menor es la adherencia efectiva. Además, como se ha explicado, un ángulo de

deriva de elevado valor implica condiciones dinámicas más exigentes, lo que podría dar lugar a la pérdida de adherencia. Por tanto, el conocimiento sobre el efecto de la transferencia de carga y ángulo de deslizamiento puede proporcionar un buen enfoque para conocer la adherencia solicitada. Los resultados de la simulación demuestran el potencial y la viabilidad de la medida de deformación, mediante bandas extensométricas en el neumático, para estimar las condiciones de trabajo del neumático. Por último, como parte del análisis se propone una metodología para la obtención de un Sistema de Detección de Deslizamiento (SDS), a partir de la herramienta de lógica difusa y los datos de deformación.

Como ya se ha indicado, en este capítulo se ha desarrollado un sistema basado en lógica difusa para estimar el ángulo de deriva y la fuerza vertical. Para hacer esto se han tomado algunos puntos significativos de las curvas experimentales de deformación como entradas para el sistema desarrollado en lógica difusa.

Dado que la velocidad de giro del neumático puede ser estimada de forma precisa por el periodo pico a pico en las curvas de deformación, y/o por el valor de *offset* (directamente relacionado con la fuerza centrífuga), en esta ocasión se ha tomado como parámetro de entrada. Además, aunque la presión de inflado puede estimarse a partir de la deformación del neumático, se puede medir correctamente a través de los sistemas actuales, por lo que en esta simulación se asume como un parámetro conocido. De este modo, se han desarrollado tres bloques de lógica difusa para 0,8, 1 y 1,2 bares de presión de inflado, puesto que 1 bar es la presión de inflado nominal para este neumático de FSAE. Una vez que la presión de inflado se toma como conocida, el bloque mostrado en la Figura 8.10 (a) se utiliza para la propuesta de sistema en lógica difusa.

Para definir el esquema de bloques que sigue el sistema de estimación se han considerado 3 entradas de las curvas de deformación: los picos de máxima deformación a tracción del canal 3 (deformaciones en dirección transversal) al comienzo y al final de la huella de contacto (puntos D y E, Figura 6.3) y los valores del *offset* del canal 2 (ver Figura 6.3), los cuales tienen un buen potencial, siguiendo la clasificación de la Tabla 7.3. Teniendo en cuenta que los valores del *offset* para una velocidad determinada solo cambian significativamente al variar el ángulo de deriva, se ha considerado como un parámetro conocido para obtener mejores estimaciones del ángulo de deriva. Esto, además, es perfectamente admisible dado el estado actual de la tecnología.

Para entenderlo mejor, la Figura 8.10 representa de forma simplificada la interfaz de la herramienta de lógica difusa en función de las entradas y salidas del sistema considerado.

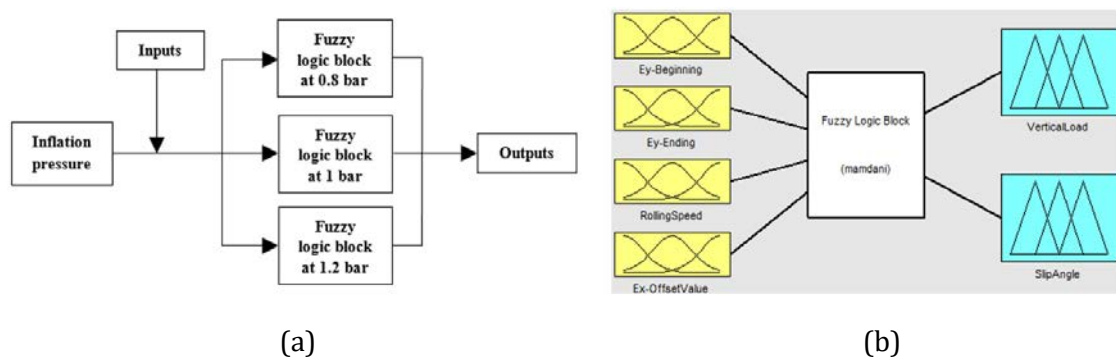


Figura 8.10. (a) Esquema de funcionamiento; (b) interfaz de la herramienta de lógica difusa.

Como se puede observar, las reglas en lógica difusa que definen las relaciones entre las entradas y salidas son cruciales a la hora de desarrollar dicho sistema, dado que estos indican la influencia de la fuerza vertical y el ángulo de deriva en la deformación del neumático.

En la Figura 8.11 (a) se muestra la sintaxis de las reglas utilizadas para la estimación de la fuerza vertical, mientras que en la Figura 8.11 (b) se muestran las utilizadas para estimar el ángulo de deriva.

47. If (Ey-in is 875) and (Ey-out is 1050) and (velocidad is 30) and (offset is 935) then (carga is 250) (1)	1. If (velocidad is 10) and (offset is 725) then (angulo is 0) (1)
48. If (Ey-in is 875) and (Ey-out is 1050) and (velocidad is 30) and (offset is 935) then (carga is 375) (1)	2. If (velocidad is 30) and (offset is 725) then (angulo is 0) (1)
49. If (Ey-in is 875) and (Ey-out is 1050) and (velocidad is 30) and (offset is 935) then (carga is 500) (1)	3. If (velocidad is 50) and (offset is 835) then (angulo is 0) (1)
50. If (Ey-in is 1025) and (Ey-out is 1125) and (velocidad is 30) and (offset is 935) then (carga is 625) (1)	4. If (velocidad is 10) and (offset is 935) then (angulo is 2) (1)
51. If (Ey-in is 1250) and (Ey-out is 1200) and (velocidad is 30) and (offset is 935) then (carga is 750) (1)	5. If (velocidad is 30) and (offset is 935) then (angulo is 2) (1)
52. If (Ey-in is 1325) and (Ey-out is 1275) and (velocidad is 30) and (offset is 935) then (carga is 875) (1)	6. If (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (angulo is 2) (1)
53. If (Ey-in is 1475) and (Ey-out is 1275) and (velocidad is 30) and (offset is 935) then (carga is 1000) (1)	7. If (velocidad is 10) and (offset is 1325) then (angulo is 4) (1)
54. If (Ey-in is 425) and (Ey-out is 675) and (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (carga is 250) (1)	8. If (velocidad is 30) and (offset is 1325) then (angulo is 4) (1)
55. If (Ey-in is 425) and (Ey-out is 675) and (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (carga is 375) (1)	9. If (velocidad is 50) and (offset is 1440) then (angulo is 4) (1)
56. If (Ey-in is 425) and (Ey-out is 675) and (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (carga is 500) (1)	10. If (velocidad is 10) and (offset is 1680) then (angulo is 6) (1)
57. If (Ey-in is 650) and (Ey-out is 750) and (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (carga is 625) (1)	11. If (velocidad is 30) and (offset is 1860) then (angulo is 6) (1)
58. If (Ey-in is 800) and (Ey-out is 900) and (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (carga is 750) (1)	12. If (velocidad is 50) and (offset is 1680) then (angulo is 6) (1)
59. If (Ey-in is 950) and (Ey-out is 975) and (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (carga is 875) (1)	13. If (velocidad is 10) and (offset is 1930) then (angulo is 8) (1)
60. If (Ey-in is 1175) and (Ey-out is 1050) and (velocidad is 50) and (offset is 1075) then (carga is 1000) (1)	14. If (velocidad is 30) and (offset is 1930) then (angulo is 8) (1)
61. If (Ey-in is 425) and (Ey-out is 525) and (velocidad is 10) and (offset is 1325) then (carga is 250) (1)	15. If (velocidad is 50) and (offset is 1930) then (angulo is 8) (1)
62. If (Ey-in is 650) and (Ey-out is 750) and (velocidad is 10) and (offset is 1325) then (carga is 375) (1)	16. If (velocidad is 10) and (offset is 1785) then (angulo is 10) (1)
63. If (Ey-in is 875) and (Ey-out is 975) and (velocidad is 10) and (offset is 1325) then (carga is 500) (1)	17. If (velocidad is 30) and (offset is 1785) then (angulo is 10) (1)
64. If (Ey-in is 1025) and (Ey-out is 1050) and (velocidad is 10) and (offset is 1325) then (carga is 625) (1)	18. If (velocidad is 50) and (offset is 1860) then (angulo is 10) (1)
65. If (Ey-in is 1175) and (Ey-out is 1125) and (velocidad is 10) and (offset is 1325) then (carga is 750) (1)	
66. If (Ey-in is 1250) and (Ey-out is 1200) and (velocidad is 10) and (offset is 1325) then (carga is 875) (1)	

(a)

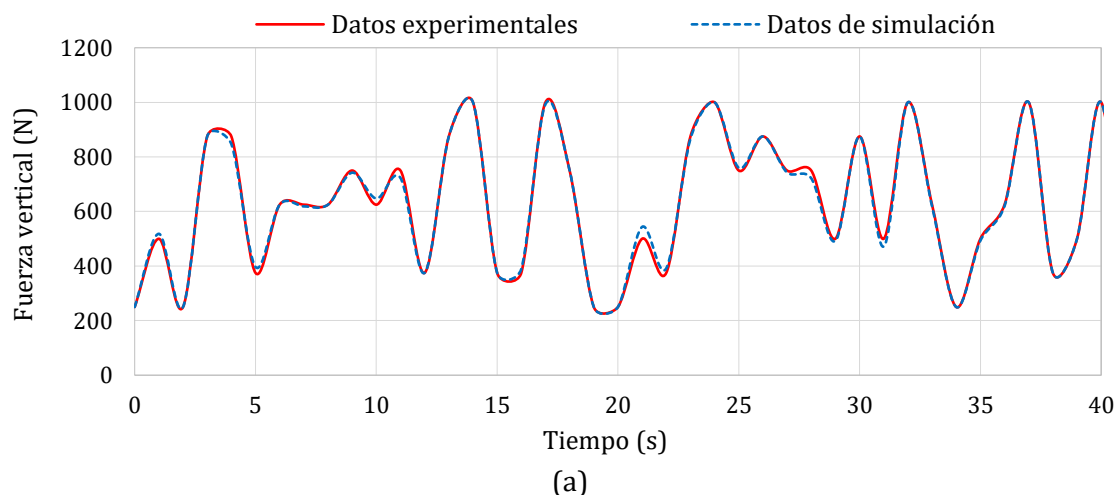
(b)

Figura 8.11. (a) Set de reglas para estimar la fuerza vertical; (b) set de reglas para estimar el ángulo de deriva.

En total, se han utilizado aproximadamente 150 reglas para cada *Fuzzy Logic Block*. En la Figura 8.11 se observa que para la estimación de la fuerza vertical se han utilizado fundamentalmente los picos de deformación a la entrada y salida de la huella de contacto en sentido lateral, la velocidad de rodadura y el valor del *offset* en sentido longitudinal, mientras que para la estimación del ángulo de deriva se ha utilizado el valor de *offset* en el canal dispuesto longitudinalmente y la velocidad de rodadura. Por lo tanto, hacen un total de cinco entradas y dos salidas.

8.3.2 Resultados de estimación y validación

La Figura 8.12 muestra algunos resultados de las simulaciones obtenidas para la fuerza vertical. Estas simulaciones se han llevado a cabo a 10, 30 y 50 km/h (en condiciones estacionarias) y a diferentes presiones de inflado (0,8, 1 y 1,2 bar), asumiendo que el conductor gira el volante de un lado a otro de forma que el ángulo de deriva varía de 0° a 10° y viceversa.



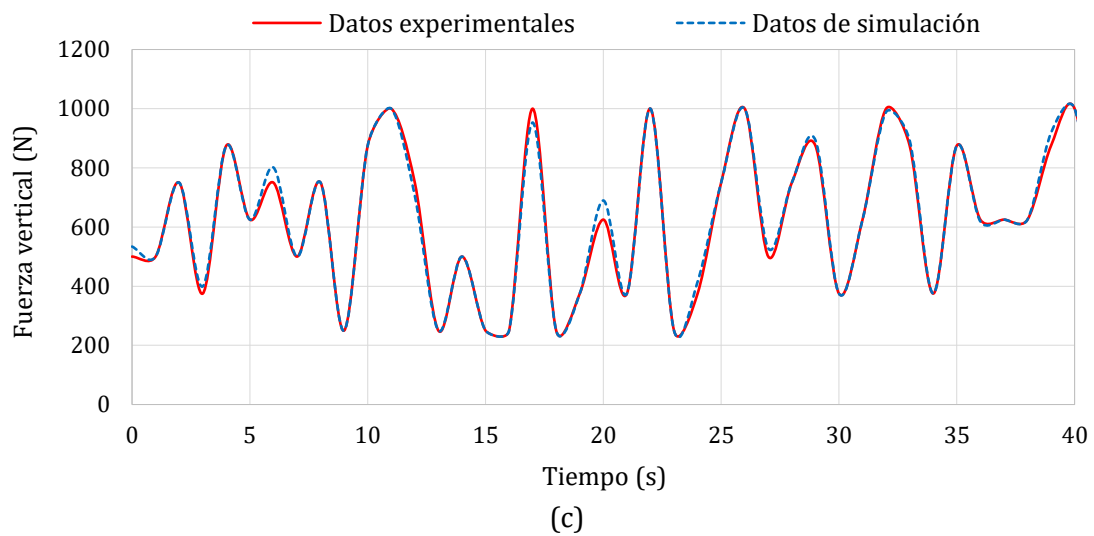
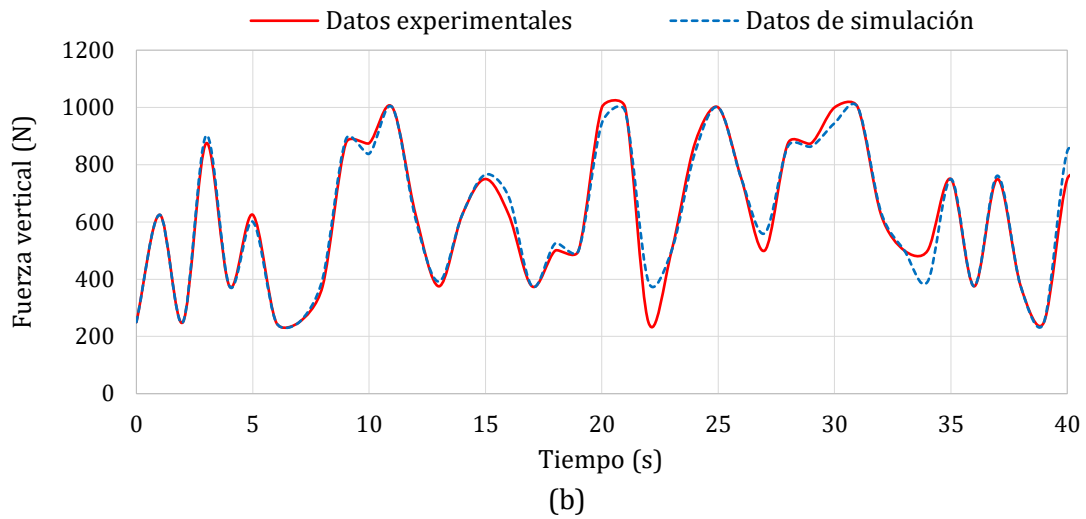
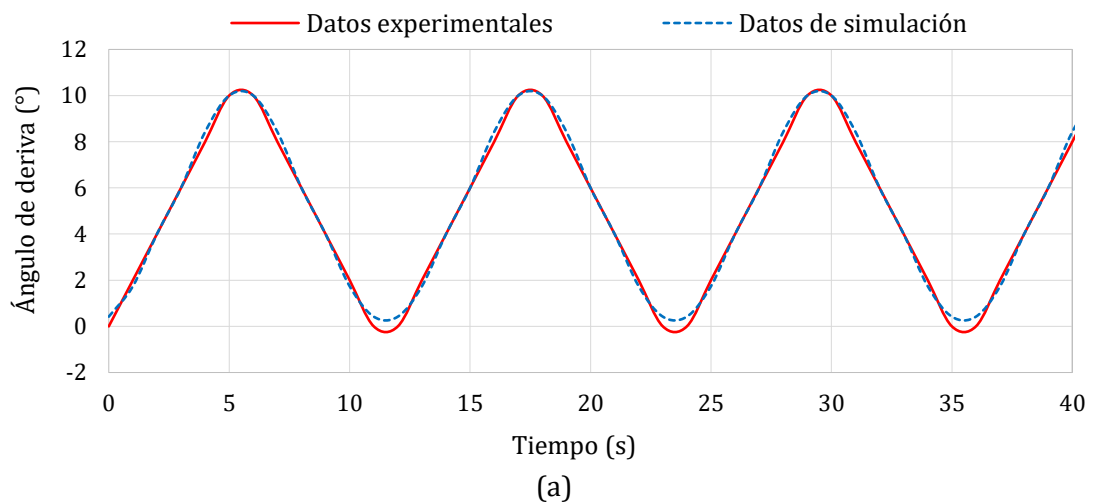


Figura 8.12. Resultados de la simulación de la fuerza vertical para (a) 10 km/h, 0,8 bar; (b) 30 km/h, 1 bar y (c) 50 km/h, 1,2 bar.

En la Figura 8.13 se muestran los resultados de simulación para el ángulo de deriva. Se observa como los resultados prácticamente se superponen con los datos experimentales, exceptuando las simulaciones para ángulos comprendidos entre 0° y 2° , donde el error aumenta.



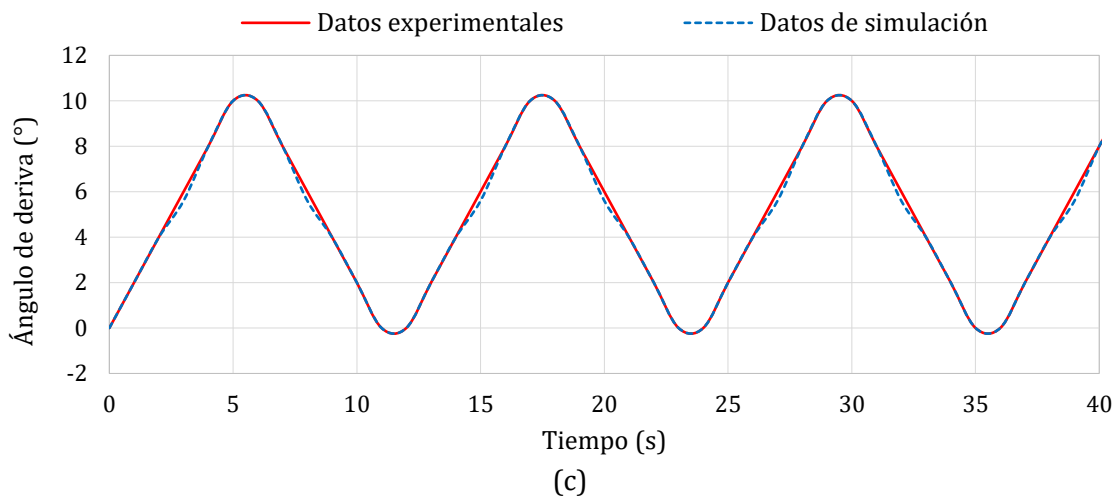
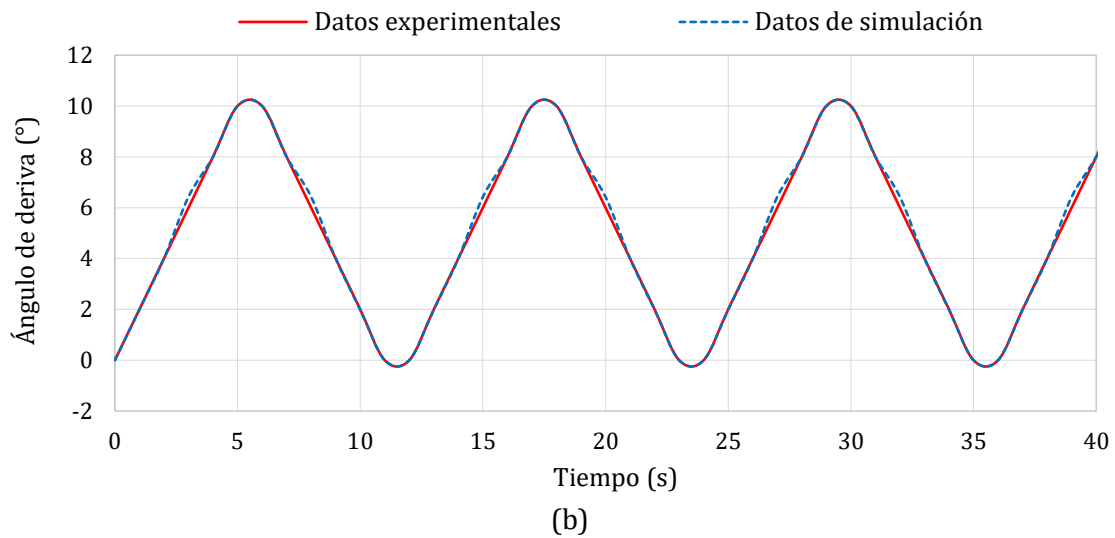


Figura 8.13. Resultados de la simulación del ángulo de deriva a (a) 10 km/h, 0,8 bar; (b) 30 km/h, 1 bar y (c) 50 km/h, 1,2 bar.

La Figura 8.13 muestra que los resultados de las simulaciones son consistentes para todos los casos, dado que los resultados experimentales y las curvas de valores estimados prácticamente se superponen. Los mayores errores registrados (ver Tabla 8.2) están localizados en zonas muy concretas que podrían ser optimizadas en desarrollos futuros. Cabe resaltar que, de hecho, los resultados podrían mejorarse con un conjunto de datos experimentales más completo.

La Tabla 8.2 muestra el error medio para los valores de la simulación.

Tabla 8.2. Error medio de la fuerza vertical y del ángulo de deriva en los resultados de las simulaciones.

Presión (bar)	Velocidad (km/h)	Error fuerza vertical (%)	Error ángulo de deriva (%)
0,8	10	1,36	3,71
	30	1,64	0,314
	50	5,42	11,29
1	10	3,80	1,82
	30	4,18	1,52
	50	3,81	0,78
1,2	10	3,64	0,73
	30	2,28	0,69
	50	1,63	1,38

Como se puede observar, el error medio es de menos del 6% para cualquiera de las condiciones simuladas. En total, el error medio para la fuerza vertical y el ángulo de deriva es de 3,08% y 2,47%, respectivamente. En la Tabla 8.2 se observa que las estimaciones de la fuerza vertical y el ángulo de deriva muestran un error elevado para una presión de inflado de 0,8 bar y 50 km/h, en comparación con los errores registrados para cualquier otra condición de presión y velocidad. Esto es debido a que el valor medio obtenido en la deformación es muy similar para ángulos de deriva bajos y altos, como se explica en el siguiente apartado, por lo que podría solucionarse de forma específica y mejorar la estimación para estas condiciones. En general, la lógica difusa permite conseguir mejores estimaciones del ángulo de deriva porque los valores de deformación que se han usado para estimarlo, partiendo del *offset*, dependen fundamentalmente en la velocidad de giro y en el ángulo de deriva (parámetro estimado). Por el contrario, el valor máximo de deformación a tracción utilizado para estimar la fuerza vertical (puntos D y E, ver Figura 6.3) depende de todos los parámetros estudiados en los ensayos. Esta mayor interdependencia dificulta establecer reglas claras y unívocas de estimación. Así pues, es posible afirmar que el método propuesto puede estimar de forma precisa el ángulo de deriva y la fuerza vertical a partir de los datos de deformación.

8.4 Sistema de detección del deslizamiento lateral

Las posibilidades de los neumáticos para estimar la adherencia, tanto solicitada como total, es uno de los principales objetivos de las investigaciones sobre el neumático inteligente. Sin embargo, no debe olvidarse que estas estimaciones han de ser útiles para otros sistemas de control activo. En este apartado se propone un Sistema de Detección del Deslizamiento (*Slip Detection System*, SDS), desarrollado a partir de los datos de deformación en el neumático.

A pesar de que el rango estudiado en los ensayos comprende medidas del ángulo de deriva entre 0° y 14°, las simulaciones únicamente han llegado hasta 10°. Como se muestra en la Figura 8.14 (a), dado que los valores de deformación decrecen drásticamente cuando el neumático comienza a deslizarse (ángulos de deriva superiores a 10°), los valores de desplazamiento para 13° y 14° dan resultados similares a los obtenidos para ángulos de 0°, 2° o 4°. Así pues, la medición de las deformaciones utilizada para desarrollar las herramientas de estimación del ángulo de deriva, no permite obtener un resultado unívoco y diferente para cada ángulo de deriva.

Contrariamente a lo que pueda parecer, esta ambigüedad puede ser usada para diseñar un sistema de detección de deslizamiento. Como ejemplo, asumamos que se mide el ángulo de giro del volante mientras se conduce, algo bastante habitual en cualquier sistema de control de estabilidad de los vehículos actuales. Esto nos daría exactamente un giro de la rueda impuesto por el sistema de dirección de manera unívoca y precisa. Con esta información, si el ángulo de la rueda aumenta y el ángulo de deriva estimado (a través de los datos recogidos en tiempo real) disminuye, el SDS puede alertar al conductor de que el neumático está perdiendo adherencia antes de que se produzca un accidente, como se indica en la Figura 8.14 (a). Por otra parte, la propia transferencia de carga nos proporciona información sobre las condiciones de giro, aceleración y/o frenado a las que está sometido el vehículo, por lo que también podría permitirnos establecer relaciones útiles de cara a desarrollar un sistema de control.

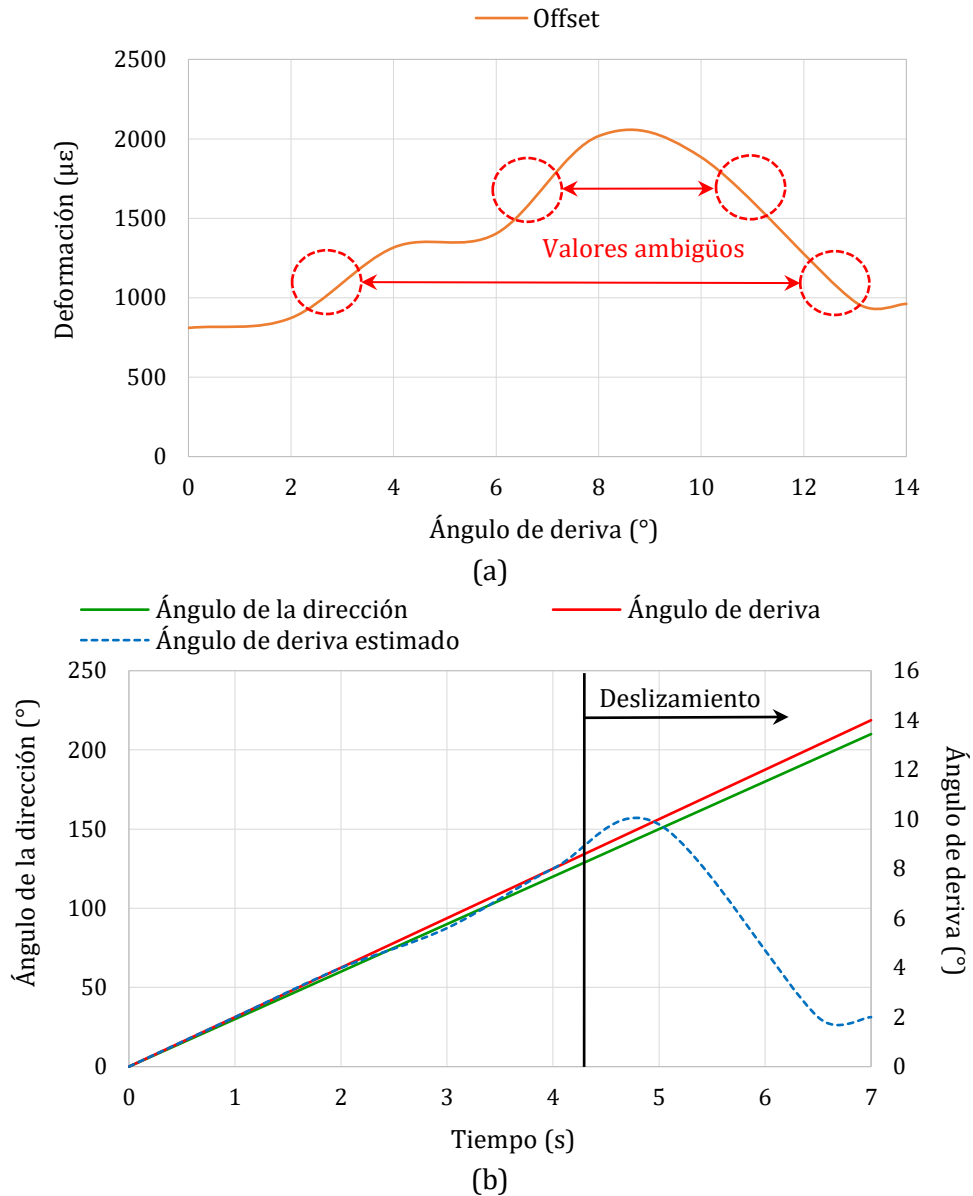


Figura 8.14. (a) Valores ambiguos en los datos de desplazamiento; (b) ejemplo del SDS para 1,2 bar, 250 N, 10 km/h.

De este modo, los sensores de deformación, combinados con metodologías de estimación, tienen un elevado potencial para ser utilizados como sistema activo de seguridad, formando parte de los actuales sistemas de asistencia a la conducción. Si se detectan condiciones de deslizamiento, el neumático podrá dar esta información al ABS o al ESC para que estos actúen y eviten la pérdida de control del vehículo. En este ámbito, a pesar de que este SDS es solo una propuesta para ser desarrollada en un futuro cercano, este sistema puede contribuir de forma sustancial a la prevención de los accidentes y por tanto mejorar el papel de los neumáticos en la mejora de la seguridad de los vehículos.

8.4.1 Estimación del coeficiente de adherencia lateral solicitado

A partir de los datos experimentales estudiados en el análisis de resultados y las estimaciones realizadas, se propone un paso más en la estimación del coeficiente de

adherencia lateral solicitado (*Lateral Friction Coefficient*, LFC) en cada instante de tiempo. Como se ha explicado en la Figura 6.6, la fuerza lateral depende fundamentalmente del ángulo de deriva y la fuerza vertical aplicada sobre el neumático. Dichas variables se han analizado de un modo exhaustivo y se han desarrollado herramientas de estimación que arrojan buenos resultados. La estimación de estas variables permite desarrollar un modelo experimental para caracterizar y calcular el comportamiento de la fuerza lateral en diferentes condiciones dinámicas. Partiendo de la curva experimental que relaciona estas tres variables, como se muestra en la Figura 8.15, se ha establecido una relación matemática (Ec. 14) que ofrece buenos resultados tanto en la zona de comportamiento elástico como en la zona de transición (el coeficiente de correlación obtenido es igual a 0,98):

$$F_y = C_1 + (C_2 \cdot F_z) \cdot (1 - e^{(C_3 \cdot \alpha)}) \quad \text{Ec. 14}$$

donde $C_1 = 10$, $C_2 = 0,889$ y $C_3 = -1,06$ para este neumático de ensayo.

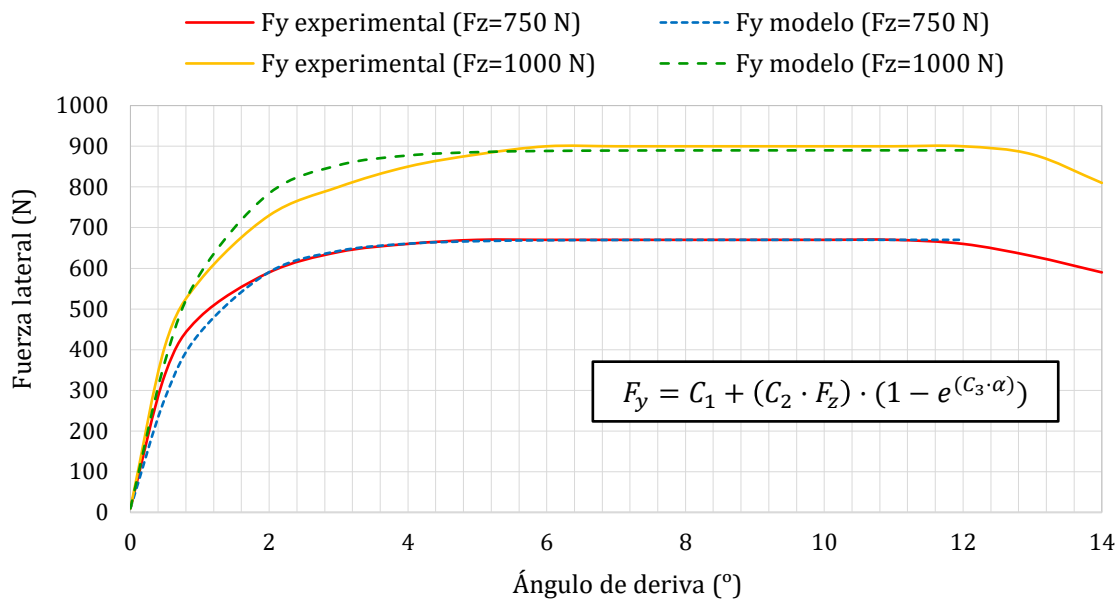


Figura 8.15. Modelo experimental de F_y en función de F_z y α para 30 km/h y 0,8 bar.

Como se puede observar, a partir de la forma de la curva se ha establecido una función exponencial para relacionar la fuerza lateral con las otras dos variables. Este tipo de curvas son bien conocidas para distintos neumáticos y se sabe que siguen una forma equivalente, por lo que habría que obtener los datos experimentales correspondientes para ajustar la Ec. 14 para cada modelo de neumático. De hecho, distintos estudios han utilizado modelos de tipo exponencial para caracterizar el comportamiento de la fuerza lateral del neumático con el ángulo de deriva [85-87]. Esta información es conocida por todos los fabricantes de neumáticos, por lo que habría una interesante línea de negocio para comercializar esta información y personalizarla para cada sistema de asistencia a la conducción (en función del fabricante del vehículo).

Se puede ver que la ecuación propuesta no permite calcular con precisión los valores de fuerza lateral superiores a 10° . Sin embargo, lejos de suponer un problema, permite establecer el inicio del deslizamiento por diferencia entre la curva experimental y la calculada a partir de la ecuación. De este modo, son varias las estrategias que han sido propuestas en este capítulo para estimar el punto de inicio del deslizamiento y que tendrán que ser analizadas en profundidad en desarrollos futuros.

8.4.2 Implementación del SDS y estimación del LFC

El sistema desarrollado mediante lógica difusa en Simulink utiliza las estimaciones previas del ángulo de deriva y la fuerza vertical, tal y como se puede ver en la Figura 8.16.

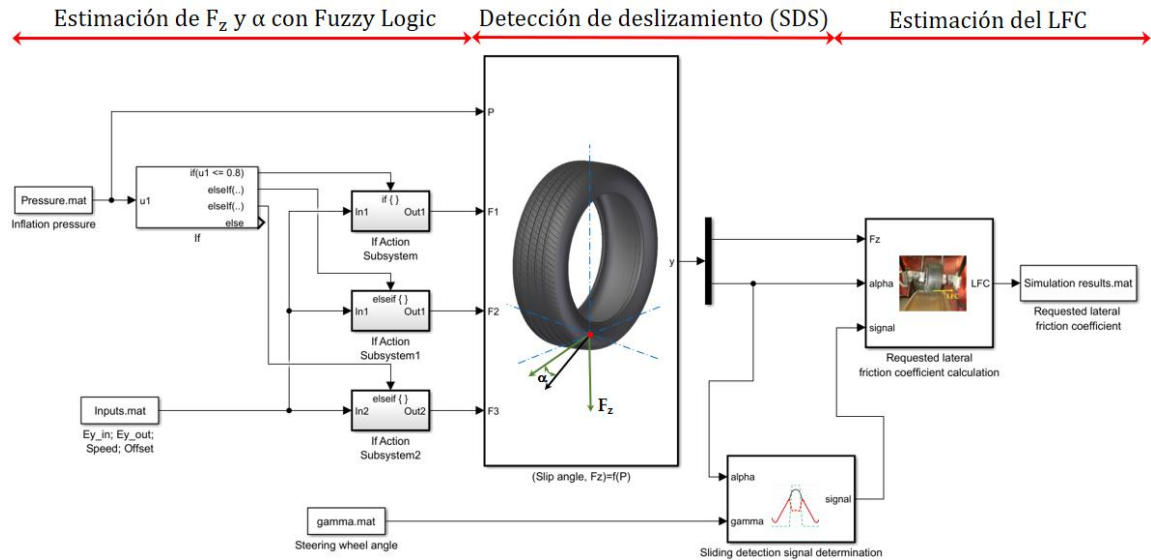


Figura 8.16. Implementación del modelo experimental de F_y para el desarrollo del SDS y la estimación del LFC.

Para el desarrollo de este sistema se ha contado con los datos registrados por el sensor goniométrico instalado en el volante, sistema disponible en cualquier vehículo con control de estabilidad. No obstante, sirve de base para evaluar las diferentes técnicas de detección del inicio del deslizamiento que se han propuesto en la presente Tesis Doctoral.

Como límite de decisión se ha decidido establecer un 10% de diferencia entre el ángulo de deriva y el ángulo de la rueda fijado por el sistema de dirección. Cuando esto sucede, se refleja en una variable de salida específica que toma el valor 1, activando el modo de funcionamiento (estimación y cálculo) en condiciones de deslizamiento. Se han realizado diversas pruebas y este límite ha dado buenos resultados en las simulaciones de validación realizadas (ver Figura 8.17).

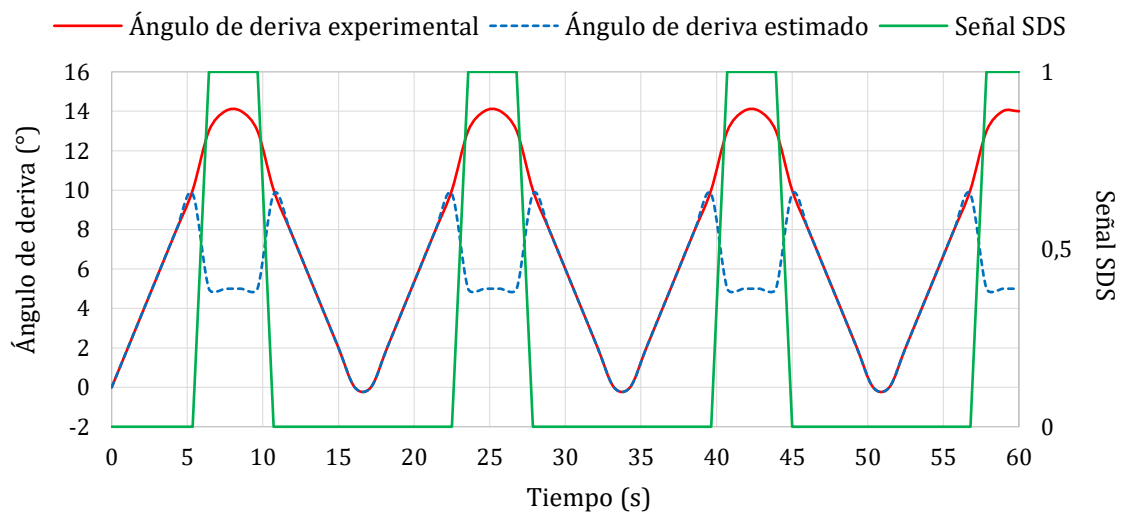


Figura 8.17. Identificación del deslizamiento a partir de la estimación del ángulo de deriva.

En el último módulo del esquema mostrado en la Figura 8.16 se calcula el valor del LFC, a partir de las estimaciones previas, mediante la Ec. 15 [88]:

$$\text{LFC} = \frac{F_y}{F_z} \quad \text{Ec. 15}$$

Además, es necesario comentar que, como el deslizamiento está siendo estimado previamente al cálculo del LFC (ver Figura 8.16), se le ha asignado un valor de 0 al LFC (señal SDS) cuando el neumático no desliza, y un valor de 1 cuando lo hace.

La Figura 8.18 a muestra los resultados estimados junto a los valores experimentales para diferentes ensayos.

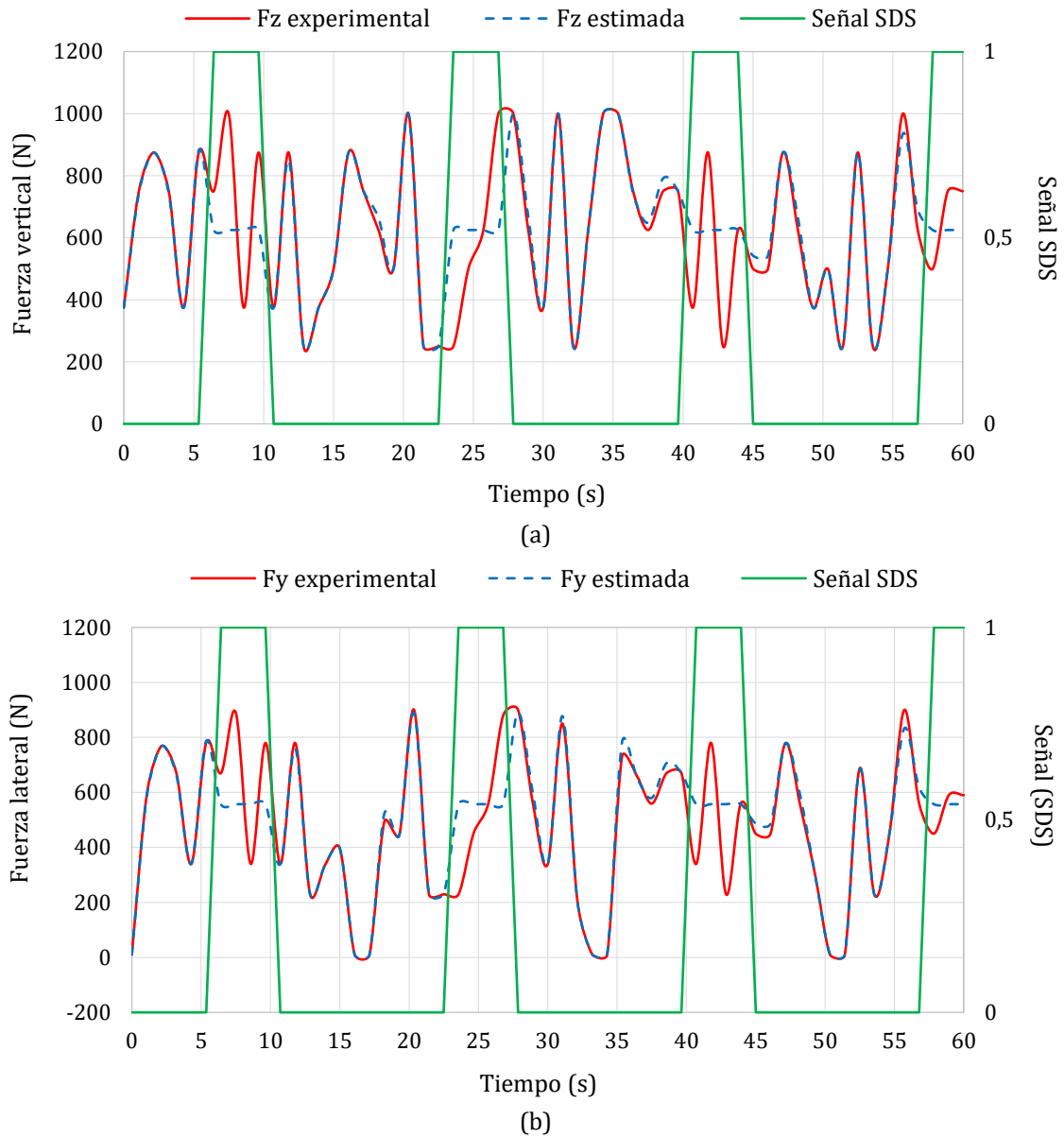


Figura 8.18. Resultados de simulación de (a) F_z y (b) F_y .

Como se puede ver en la Figura 8.18, en condiciones de deslizamiento las estimaciones de F_z y F_y , comparadas con los valores experimentales de F_z y F_y empeoran. Sin embargo, ese rango de utilización no es el que proporciona beneficios desde el punto de

vista del control del vehículo, por lo que esto no supone un problema significativo. Por el contrario, fuera de la zona de deslizamiento se observa que la precisión de los resultados estimados es elevada. Concretamente, las estimaciones de F_z presentan errores inferiores al 1,64% y las de F_y inferiores al 3,11%, fuera de la zona de deslizamiento.

En cuanto al cálculo del LFC, ver la Figura 8.19, como parte de las estimaciones de F_z y F_y presenta el mismo comportamiento ya descrito. Fuera de la zona de deslizamiento se obtienen valores del LFC que difieren en menos de un 1,5% con los datos experimentales.

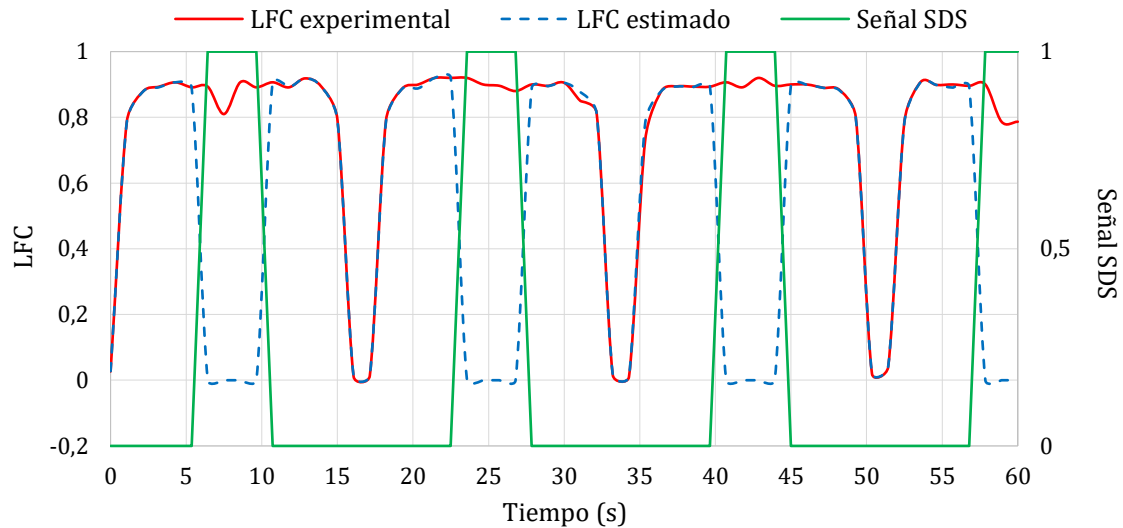


Figura 8.19. Estimación del LFC comparada con valores teóricos calculados.

Finalmente, aunque se pudiera pensar que las buenas estimaciones obtenidas del ángulo de deriva (ver Figura 8.17) cuando el neumático está trabajando al límite de adherencia no son muy útiles, el ángulo de deriva lateral de un vehículo, que es la relación entre la velocidad de avance y la lateral en forma de ángulo, depende en gran medida del ángulo de deriva de los neumáticos, por lo que su estimación puede proporcionar información a este respecto. Además, el ángulo de deriva de los neumáticos puede resultar esencial para los sistemas de seguridad activo de los vehículos.

Como conclusión, se puede decir que la posibilidad de detectar que el neumático está trabajando o ha dejado de trabajar al límite de adherencia ha quedado demostrada mediante la implementación realizada en Simulink. Además, el modelo experimental obtenido para estimar el coeficiente de adherencia lateral solicitado en el contacto neumático-calzada ha mostrado una buena fiabilidad en comparación con el cálculo teórico cuando el neumático está trabajando al límite de adherencia.

Sin embargo, con respecto al tiempo computacional, el sistema de estimación desarrollado debe optimizarse para cumplir con los requisitos de la adquisición de datos en tiempo real. Además, una de las limitaciones del sistema propuesto es que sólo funcionaría en la primera etapa del subviraje, ya que la relación entre el ángulo de la dirección de avance de la rueda y ángulo de deriva del neumático permanece constante sólo durante esta etapa.

Por lo tanto, es necesario llevar a cabo en el futuro un análisis de la variación entre estos ángulos a partir de ciertos valores, y que esta información proporcionaría estimaciones más precisas cuando el neumático esté trabajando al límite de adherencia.

Por otro lado, es necesario aclarar que el trabajo realizado en este capítulo sirve como primera aproximación para estimar el coeficiente de adherencia lateral solicitado,

pero resulta evidente que el modelo definido en la Ec. 14 sólo es válido para el neumático y la superficie utilizada, por lo que en el futuro deben aplicarse diferentes modelos para diferentes combinaciones neumático-calzada.

Capítulo 9

Conclusiones

9.1 Conclusiones

Este capítulo resume los resultados y logros del trabajo realizado. En primer lugar, se destaca el contenido principal de la Tesis Doctoral y las contribuciones de la misma para el desarrollo del neumático inteligente mediante bandas extensométricas, verificando que todos los objetivos de la Tesis se han cumplido. Como conclusiones y contribuciones generales del trabajo realizado, se debe destacar lo siguiente:

- Se han llevado a cabo ensayos en condiciones de línea recta en régimen estacionario. El principal equipamiento utilizado ha sido: un banco de ensayo de neumáticos, equipos de adquisición de datos, dos neumáticos y bandas extensométricas.
- Los prototipos de neumáticos inteligentes utilizados en esta Tesis han mostrado que las bandas extensométricas son adecuadas para medir con precisión bajo condiciones dinámicas, considerando las condiciones exigentes en que están envueltos los neumáticos durante la rodadura. De este modo, la viabilidad, robustez y potencial de los neumáticos instrumentados con bandas extensométricas han sido demostrados y corroborados.
- Antes de comenzar el análisis de datos, se han calculado los ciclos medios representativos de las curvas de deformación para cada condición de ensayo, considerando la deformación media para cada punto del perímetro de los neumáticos calculando el valor medio independientemente. De este modo, se pueden comparar las curvas de deformación obtenidas mediante la variación de las condiciones de ensayo.
- Los resultados expuestos han confirmado que la forma de las curvas de deformación para condición de trabajo del neumático proporciona información interesante y permite diferenciar los parámetros de ensayo a partir de las mismas.
- El análisis y la identificación de los picos de máxima deformación han demostrado ser claves para la adquisición de información a partir de la señal de deformación. Las variaciones de los puntos característicos de las curvas se han utilizado para estimar el coeficiente de adherencia lateral solicitado en el contacto neumático-calzada y se ha mostrado el potencial para detectar la pérdida de adherencia del neumático en fase temprana de deslizamiento.

- A pesar de que las bandas extensométricas se instalaron en la parte central de la huella de contacto y que la longitud de las mismas es de apenas unos milímetros, son capaces de proporcionar información relevante a lo largo de más de 500 mm del perímetro del neumático, más de un tercio del total. De este modo, para obtener información sobre la totalidad del perímetro, sería suficiente con colocar bandas extensométricas cada 120°. Sin embargo, para estudiar y analizar el comportamiento del neumático, sería suficiente con colocar un único sensor.
- Aunque algunas de las condiciones de trabajo estudiadas se pueden monitorizar utilizando varios sensores, el objetivo último de los neumáticos instrumentados utilizados es proporcionar un medio para realizar medidas fiables y precisas de todas las variables de funcionamiento posibles utilizando el mínimo número de sensores. Por tanto, es necesario llevar a cabo un análisis exhaustivo de la deformación de la banda de rodadura para valorar la posibilidad de estimar la presión de inflado, ya que cuando el neumático está rodando, la influencia de la presión muestra resultados poco claros debido a que la fuerza vertical o el ángulo de deriva tienen mayor influencia sobre los datos de deformación.
- Finalmente, además del conocimiento multidisciplinar sobre sensores, análisis de datos, características del neumático, etc., que es necesario para el desarrollo del neumático inteligente, la involucración de las herramientas computacionales es absolutamente necesaria para aprovechar los datos proporcionados por los sensores.

De la primera fase experimental con el neumático tipo I, donde los ensayos se realizaron con ángulo de caída nulo, se extraen las siguientes conclusiones:

- En condiciones de línea recta, los picos de máxima deformación al comienzo y final del área de contacto proporcionan información significativa sobre los cambios en la fuerza vertical, tanto en dirección de medida longitudinal como lateral. Cuando la fuerza vertical aumenta, los picos de máxima deformación a tracción y compresión también aumentan. En cuanto a los cambios de velocidad, se recomienda utilizar los datos de deformación proporcionados con los sensores dispuestos lateralmente, especialmente por los valores del *offset*, ya que los datos proporcionados en dirección longitudinal no son lo suficientemente claros.
- En condiciones de paso por curva, la pérdida de adherencia se muestra en los valores de máxima deformación a tracción, hasta tal punto que cuando el neumático empieza a deslizarse, los valores de deformación aumentan o disminuyen drásticamente dependiendo de la dirección de medida. Para detectar este hecho, los canales dispuestos en la parte exterior de la huella de contacto (tanto en dirección longitudinal como lateral) proporcionan información más clara sobre el ángulo de deriva. Sin embargo, el sensor colocado en la parte interior de la huella de contacto sólo muestra información relevante sobre la fuerza vertical al comienzo y final de la huella de contacto. Además, el pico de máxima deformación a tracción que se registra a fuerzas verticales bajas dificulta la extracción de información a partir de este sensor.

La segunda fase experimental, en la que se utilizó el neumático tipo II, permite conocer la influencia del ángulo de caída y la importancia sobre el posicionamiento de los sensores:

- A pesar del hecho de que se consideró un cierto ángulo de caída, se han obtenido curvas de deformación muy similares a las de la primera fase experimental desde un punto de vista cualitativo, corroborando las conclusiones obtenidas hasta el momento.
- Es importante tener en cuenta la influencia del ángulo de caída para propósitos de estimación, ya que éste afecta a la distribución de la fuerza vertical sobre la banda de rodadura. En línea recta, el ángulo de caída afecta a los valores de los picos máximos de deformación tanto en dirección longitudinal como lateral, sin embargo, la influencia de este parámetro es más acusada en los canales colocados longitudinalmente en cuanto a los valores de deformación máxima. Debido al ángulo de caída, la deformación máxima obtenida en el punto de contacto con la calzada se puede multiplicar varias veces.
- En cuanto al posicionamiento de los sensores, los canales instalados cerca de los hombros del neumático (es decir, en una zona más flexible), miden valores superiores de deformación y muestran mayor sensibilidad a los cambios que aquellos instalados cerca del plano medio longitudinal del neumático. Por este motivo, aunque el área cerca de los flancos sea más flexible y por tanto más propensa para que los sensores resulten dañados, esta zona es recomendable. Esta conclusión se confirma también en los ensayos realizados en condiciones de paso por curva, donde los canales colocados cerca de los hombros también proporcionan mejor información sobre la variación del ángulo de deriva.
- Del mismo modo que en la primera fase experimental, a fuerzas verticales bajas los canales instalados en la parte interior de la huella de contacto miden un pico de máxima deformación a tracción en lugar de a compresión. Como los neumáticos están fundamentalmente compuestos de caucho (un material viscoelástico) y múltiples capas con diferentes componentes, es complicado descubrir el modo en que la deformación se comporta a través de los materiales desde el contacto con la calzada hasta la superficie donde están colocados los sensores. Cualquiera que sea la razón por la que se produce este fenómeno, está claro que este hecho reduce el potencial de los sensores instalados en esa localización para proporcionar información.
- La velocidad de rodadura y el ángulo de deriva muestran una relación bastante clara con las curvas de deformación obtenidas en el flanco, pero esta zona para deformarse demasiado para la robustez de los sensores colocados para medir longitudinalmente.

Finalmente, se extraen las siguientes conclusiones de la implementación desarrollada en el Capítulo 8 mediante lógica difusa:

- Mediante la implementación del sistema de *Fuzzy Logic* en MATLAB/Simulink®, se ha estudiado la posibilidad de detectar la pérdida de adherencia lateral del neumático antes de que un accidente ocurra.
- El método propuesto debe optimizarse para abordar escenarios en condiciones combinadas de deslizamiento longitudinal y lateral. Además, el coste computacional debe reducirse para los requisitos de la implementación en tiempo real.

- Una de las limitaciones del método propuesto es que éste sólo trabaja adecuadamente en la primera etapa del subviraje, ya que la relación entre el ángulo de giro de la rueda y el ángulo de deriva del neumático sólo permanece constante durante esta etapa. Por tanto, el análisis de la variación entre esos ángulos para ciertos valores forma parte del trabajo futuro, ya que esta información proporcionaría estimaciones más precisas cuando el neumático está trabajando al límite de adherencia. Además, se ha asumido que el ángulo de deriva del neumático está directamente relacionado con el ángulo de giro de la rueda, sin considerar la contribución del resto de neumáticos del vehículo. Este hecho limita la aplicación de los resultados teniendo en cuenta el comportamiento del vehículo completo, pero el análisis realizado sirve como primer paso para estimar el ángulo de deriva del vehículo mediante las correspondientes ecuaciones de estado.
- Por otro lado, del mismo modo que en otras investigaciones que realizaron experimentos en un banco de ensayos, se ha asumido que el ángulo de giro de la rueda y el ángulo de deriva del neumático (que aparece en el contacto neumático-calzada) son equivalentes y tienen el mismo comportamiento. Sin embargo, para desarrollar un sistema fiable utilizando la metodología propuesta, es necesario valorar si es posible asumir esta suposición, especialmente cuando se lleven a cabo ensayos en condiciones reales.
- El modelo experimental para estimar el coeficiente de adherencia lateral ha mostrado buenos resultados en comparación con los cálculos teóricos cuando el neumático está trabajando al límite de adherencia. El análisis de datos y las estimaciones mediante *Fuzzy Logic* ha demostrado que las bandas extensométricas en combinación con los métodos computacionales son adecuados para resolver las características no lineales del comportamiento del neumático y desarrollar un sistema de neumático inteligente.

9.2 Conclusions

This chapter summarizes the results and the achievements of the presented work. It first reviews briefly the thesis contents and the contribution to the development of the intelligent tire by means of strain gauges, verifying that all the thesis objectives have been met. As general conclusions and contributions of the work made, it should be highlighted that:

- Tests related to straight line rolling conditions at steady state have been performed. The main equipment used has been: an indoor test rig, data acquisition systems, two tires and strain sensors.
- The intelligent tire prototypes used in this Thesis have shown that strain sensors are suitable for measuring accurately under dynamic conditions considering the demanding environment of tire performance. In this way, the feasibility, robustness and prospects of a strain-based intelligent tire are demonstrated and corroborated.
- Before starting the experimental data analysis, representative strain curves for each test's conditions were calculated considering the average strain for each point of the tire perimeter by averaging the cycles separately, which were obtained under the

same driving conditions. This way, the strain signal obtained by changing the tests' parameters can be contrasted.

- The results presented have confirmed that the shape of the curve for each working condition give us interesting information and allows us to make distinctions between these conditions.
- The analysis and identification of maximum strain peaks have demonstrated to be the key of the information acquisition from strain signal. They have been used to estimate the lateral friction coefficient required in the tire-road contact and it has been shown the potential to detect the tire's loss of grip at an early stage of slipping. When sliding begins, peak strain values in the inner liner of the tread tire decrease notably.
- Despite the fact that strain gauges were placed in the middle of the contact patch and the strain gauges' lengths are just some millimetres, they were able to provide significant information about more than 500 mm of the tire perimeter, that is, more than one third of the whole tire perimeter. In this way, in order to obtain useful information from the whole perimeter, it would be enough to put in place strain gauges every 120°. However, for the purpose of studying and analysing the tire behaviour, it would be enough to set up strain gauges at one point of the tire tread.
- Although some of the studied working conditions could be measured using several sensors, the ultimate goal of the proposed tire prototype is to provide a platform for reliable and accurate measurement of more tire operating parameters/variables using the minimum number of sensors possible. So, an exhaustive analysis of tire deformation in static conditions is necessary to assess the possibility of estimating tire inflation pressure, because when the tire is rolling, the influence of inflation pressure is not shown due to little changes on vertical load or the slip angle have a big influence on strain data.
- Finally, in addition to the multi-disciplinary knowledge about sensor technology, data analysis, tire characteristics, etc. that are required for the intelligent tire development, the involvement of computational methods is absolutely necessary to take advantage of the sensor's measurements.

From the first experimental phase with the tire I, where tests without camber angle were carried out, the following conclusions are drawn:

- In straight line conditions, maximum strain peaks at the beginning and ending of the contact patch provide significant information about the vertical load changes, either in lateral or longitudinal measurement direction. When the vertical load increases, the maximum tensile or compressive strain peaks also increase. Regarding speed changes, deformation data provided by lateral strain gauges are recommended, specially the offset values, since data measured by longitudinal strain gauges are not clear enough.
- In cornering conditions, the tire's loss of grip is shown in maximum tensile strain values, to such an extent that when the tire begins sliding, maximum strain value decreases or increases radically depending on the measuring direction. For this

purpose, the channel place longitudinally and the lateral channel place in the outer part of the contact patch provide the clearest information about the slip angle. However, the channel place in the inner part of the contact patch only showed relevant information about the vertical load at the beginning and ending of the contact patch. In addition, the maximum tensile peak that appears at low vertical loads would make difficult to extract information from this channel.

The second experimental phase using the Avon tire allows us to know the influence of camber angle and provides valuable information about the sensor positioning:

- Despite of the fact that a certain camber angle was considered, it has been obtained strain curves very similar to the extracted during the first experimental phase from a qualitative point of view, corroborating the conclusions obtained previously.
- The influence of camber angle for estimation purposes must be considered, since it affects to the way in which the vertical load is distributed. In straight line, the camber angle affects to the values of the maximum strain peaks either in longitudinal or lateral measuring direction, however, the influence of this parameter is more pronounce in the channels place longitudinally than laterally regarding the maximum strain values. Due to the camber angle, the maximum deformation around the centre of the contact patch can be multiplied by several times.
- Regarding the strain gauge's position, channels placed closer to the sidewall (i.e. on a more flexible area), measured higher strain values and showed higher sensitivity than the ones that were installed closer to the longitudinal middle plane. For this reason, although the area near to the sidewall is more flexible and therefore more dangerous for the sensors to be damage, the areas closer to the sidewall would be recommended. This conclusion is also confirmed in cornering conditions, where the channels closer to the sidewall provide better information about slip angle' changes.
- In the same way that in the first experimental phase in cornering conditions, at low vertical loads, the channel placed on the inner part of the contact patch measured a maximum tensile peak instead of a compressive one. As tires are made essentially of rubber (a viscoelastic material) and multiple layers with different components, it is quite complicated to figure out the way in which the deformation pass through the material from the tire-road contact to the inner surface of the tread tire where the sensors are installed. Whatever the reason for this phenomenon, it is clear that this fact reduces the prospects of the sensors placed on this location to provide information.
- Rolling speed and slip angle show a quite linear relation with strain curves measured on the tire sidewall, but this area seems to deform too much for the robustness of strain sensors place in longitudinal direction.

Finally, some conclusions from the Fuzzy Logic implementation developed in Chapter 8 have been obtained:

- The possibility of detecting the tire's loss of grip before an accident occurs by means of the implementation of the Fuzzy Logic systems in MATLAB/Simulink® has been studied.

- In order to afford scenarios under longitudinal and lateral slip combined conditions, the proposed method should be optimized. In addition, the computational time should be reduced to meet the requirements of the real-time data acquisition.
- One of the limitations of the proposed model is that it would only work properly at the first stage of the understeer, since the relationship between the wheel steer angle and the tire slip angle remains constant just during this stage. Therefore, the analysis of the variation between these angles from certain values is part of the future works, since this information would provide more accurate estimations when the tire is working at the limit of adhesion. In addition, it has been assumed that the tire slip angle is directly related to the wheel steer angle, without considering the contribution of the other tires of the vehicle. This fact limits the application of the results taking into account the behaviour of a whole vehicle, but this analysis serves as a proof of concept for the estimation of the vehicle slip angle from the corresponding equations of state.
- On the other hand, in the same manner that other researches based on tire test rig did, it has been assumed that the wheel slip angle and the tire slip angle (that appears in the tire-road contact) are equivalent and have the same behaviour. However, in order to develop a reliable system using the proposed methodology, it will be necessary to assess if it is possible consider this assumption, especially when tests under real conditions are carried out.
- The experimental model to estimate the lateral friction coefficient has shown a good reliability compared to the theoretical calculation when the tire is working at the limit of grip. The data analysis and simulations by means of Fuzzy Logic have demonstrated that strain gauges in combination with computational methods are feasible to solve the non-linearity characteristics of the tire behaviour and develop the intelligent tire system.

Capítulo 10

Líneas futuras de investigación

Los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral son muy prometedores, lo que da pie a proponer las siguientes investigaciones futuras:

- Ampliar el rango de las condiciones de los ensayos (principalmente ensayos a alta velocidad), considerando además otros parámetros como la temperatura del neumático. Además, es necesario realizar ensayos bajo fuerzas laterales y longitudinales combinadas y con diferentes superficies de rodadura en régimen estacionario y transitorio (considerando procesos de aceleración y frenada).
- Optimizar la implementación en *Fuzzy Logic* para reducir el coste computacional y considerar el ángulo de caída, así como valorar la posibilidad de utilizar otros métodos de estimación como las Redes Neuronales Artificiales (RNA) o el filtro de Kalman.
- Desarrollar un sistema de transmisión de datos inalámbrico y de autoabastecimiento energético para los sensores con el fin de lograr monitorizar los datos en tiempo real.
- Estudiar la interacción del sistema propuesto con los datos de deformación obtenidos y los sistemas de seguridad activos como el ABS o el ESC.
- Finalmente, se sugiere valorar la posibilidad de integrar los sensores entre las capas internas del neumático para mejorar su robustez y posibilitar la producción y comercialización en masa.

Bibliografía

1. Austin, L.; Morrey, D. Recent Advances in Antilock Braking Systems and Traction Control Systems. Proc. Inst. Mech. Eng. Pt. D: J. Automobile Eng. 2000, 214, 625-638.
2. Dirección General de Tráfico. Anuario Estadístico De Accidentes, 2016. Disponible online: <http://Www.Dgt.Es/Es/Seguridad-Vial/Estadisticas-E-Indicadores/Publicaciones/Anuario-Estadistico-Accidentes/> (accedido por última vez el 1 de febrero de 2018).
3. FESVIAL: Michelín. Estudio De La Accidentalidad En España Por Defectos En Los Neumáticos De Los Vehículos. 2011,
4. FRAI. The Investigation Database of the Finnish Road Accident Investigation Teams, datos no públicos, extraídos de <http://Virtual.Vtt.Fi/>, 2001.
5. Apollo Project Report. Final Report, Including Technical Implementation Plan (Annex), Deliverable 22/23, Finland. Disponible online: http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/apollo/deliverables/apollo_final%20report.pdf (accedido por última vez el 1 de febrero de 2018).
6. Mokhiamar, O. & Abe, M. Simultaneous Optimal Distribution of Lateral and Longitudinal Tire Forces for the Model Following Control. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 2005, 126, 753-763.
7. 106th Congress of USA, USA. Transportation Recall Enhancement, Accountability and Documentation (TREAD) Act, 2000. Authenticated U.S. Government Information. Disponible online: <https://www.congress.gov/106/plaws/publ414/PLAW-106publ414.pdf> (accedido por última vez el 5 de febrero de 2018).
8. Pohl; G. Ostermayer; L. Reindl & F. Seifert. Monitoring the Tire Pressure at Cars using Passive SAW Sensors. In 1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. an International Symposium (Cat. no.97CH36118); pp. 471-474 vol.1.
9. Pohl; R. Steindl & L. Reindl. The “intelligent Tire” Utilizing Passive SAW Sensors Measurement of Tire Friction. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 1999, 48, 1041-1046.
10. Cylik, A.; Strothjohann, T. & Scholl, G. The Intelligent Tire-Applications of the Tread Sensor. In VDI Berichte, Hannover, Germany, 2001.
11. Zhang, X.; Wang, F.; Wang, Z.; Li, W. & He, D. Intelligent Tires Based on Wireless Passive Surface Acoustic Wave Sensors. In IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Washington, D.C., USA.
12. Corbett, B. Wardsauto. Disponible online: <http://Wardsauto.Com/News-Analysis/Smart-Tires-Look-New-Sidewall-Torsion-Sensors-02-Model>, 1999 (accedido por última vez el 5 de febrero de 2018).
13. Becherer, T. The Sidewall Torsion Sensor System, 2, 1998. In Fortschritt-Berichte VDI, Düsseldorf.

14. Breuer, B.; Barz, M.; Bill, K.; Gruber, S. & Strothjohann, T.; Xie, C. The Mechatronic Vehicle Corner of Darmstadt University of Technology - Interaction and Cooperation of a Sensor Tire, New Low-Energy Disc Brake and Smart Wheel Suspension. In , Seoul, South Korea.
15. Yilmazoglu, O.; Brandt, M.; Sigmund, J.; Genc, E. & Hartnagel, H.L. Integrated InAs/GaSb 3D Magnetic Field Sensors for "the Intelligent Tire". *Sensors and Actuators A: Physical* 2001, 94, 59-63.
16. Todoroki, A; Miyatani, S. & Shimamura, Y. Wireless Strain Monitoring using Electrical Capacitance Change of Tire: Part I - with Oscillating Circuit. *Smart Mater. Struct.* 2003, 12, 403.
17. W. Tjiu; A. Ahanchian & B. Y. Majlis. Development of Tire Condition Monitoring System (TCMS) Based on MEMS Sensors. In 2004 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics; pp. 4 pp.
18. Braghin, F.; Brusarosco, M.; Cheli, F.; Cigada, A.; Manzoni, S. & Mancosu, F. Measurement of Contact Forces and Patch Features by Means of Accelerometers Fixed Inside the Tire to Improve Future Car Active Control. *Veh. Syst. Dyn.* 2006, 44, 3-13.
19. Holtschulze, J.; Goertz, H. & Hüsemann, T. A Simplified Tyre Model for Intelligent Tyres. *Veh. Syst. Dyn.* 2005, 43, 305-316.
20. Hadekel, R. The Mechanical Characteristics of Pneumatic Tyres. Technical Report. 1952.
21. Matsuzaki, R. & Todoroki, A. Wireless Strain Monitoring of Tires using Electrical Capacitance Changes with an Oscillating Circuit. *Sensors and Actuators A: Physical* 2005, 119, 323-331.
22. Matsuzaki, R. & Todoroki, A. Intelligent Tires Based on Measurement of Tire Deformation. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering* 2008, 2, 269-280.
23. Matsuzaki, R. & Todoroki, A. Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires. *Sensors* 2008, 8.
24. Cullen, J.D.; Arvanitis, N.; Lucas, J. & Al-Shamma'a, A.I. In-Field Trials of a Tyre Pressure Monitoring System Based on Segmented Capacitance Rings. *Measurement* 2002, 32, 181-192.
25. Miyoshi, A.; Tsurita, T. & Kunii, M. System and Method for Determining Tyre Force. 2005.
26. M. Sergio; N. Manaresi; M. Tartagni; R. Guerrieri & R. Canegallo. On Road Tire Deformation Measurement System using a Capacitive-Resistive Sensor. In *Proceedings of IEEE Sensors 2003* (IEEE Cat. no.03CH37498); pp. 1059-1063 Vol.2.
27. Morinaga, H.; Wakao, Y.; Hanatsuka, Y. & Kobayakawa, A. The Possibility of Intelligent Tire (Technology of Contact Area Information Sensing). In *FISITA 2006 World Automotive Congress*, Yokohama, Japan, 22-27 October.
28. Tuononen, A. J. Optical Position Detection to Measure Tyre Carcass Deflections. *Veh. Syst. Dyn.* 2008, 46, 471-481.
29. Yi, J. A Piezo-Sensor-Based "Smart Tire" System for Mobile Robots and Vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2008, 13, 95-103.

30. Erdogan, G.; Alexander, L. & Rajamani, R. A Novel Wireless Piezoelectric Tire Sensor for the Estimation of Slip Angle. *Measurement Science and Technology* 2010, 21, 015201.
31. Hall, W. Finite Element Modelling and Simulation for a "Smart" Tire. 2003.
32. Matsuzaki, R.; Hiraoka, N.; Todoroki, A. & Mizutani, Y. Analysis of Applied Load Estimation using Strain for Intelligent Tires. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering* 2010, 4, 1496-1510.
33. Taghavifar, H. & Mardani, A. Investigating the Effect of Velocity, Inflation Pressure, and Vertical Load on Rolling Resistance of a Radial Ply Tire. *Journal of Terramechanics* 2013, 50, 99-106.
34. Yang, X.; Olatunbosun, O.; Garcia-Pozuelo, D. & Bolarinwa, E. FE-Based Tire Loading Estimation for Developing Strain-Based Intelligent Tire System. 2015.
35. Yang, X.; Olatunbosun, O.; Garcia-Pozuelo Ramos, D. & Bolarinwa, E. Experimental Investigation of Tire Dynamic Strain Characteristics for Developing Strain-Based Intelligent Tire System. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 2013, 6, 97-108.
36. Magori, V.; Magori, V.R. & Seitz, N. On-Line Determination of Tire Deformation, a Novel Sensor Principle. In *Proceedings of the IEEE Symposium, Sendai, Japan, 5-8 October*.
37. Eom, J.; Lee, H. & Choi, B. A Study on the Tire Deformation Sensor for Intelligent Tires. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 2014, 15, 155-160.
38. Chankyu Lee; K. Hedrick & Kyongsu Yi. Real-Time Slip-Based Estimation of Maximum Tire-Road Friction Coefficient. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2004, 9, 454-458.
39. Pasterkamp, W.R. & Pacejka, H.B. The Tyre as a Sensor to Estimate Friction. *Veh. Syst. Dyn.* 1997, 27, 409-422.
40. Baun, R. Das Neue E-Klasse T-Modell Von Mercedes-Benz. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 2003, 105, 544-546.
41. Heissing, B. & Ersoy, M. Chasis Handbook. Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives.; Vieweg+Teubner, 2011.
42. Li, L. & Wang, F-Y. Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles.; Springer: New York, 2007.
43. Stelzer, A.; Schimetta, G.; Reindl, L.; Springer, A. & Weigel, R. Wireless SAW Sensors for Surface and Subsurface Sensing Applications. In , 2001; pp. 358-366.
44. Reindl, L. M.; Pohl, A.; Scholl, G. & Weigel, R. SAW-Based Radio Sensor Systems. *IEEE Sensors Journal* 2001, 1, 69-78.
45. Cao, S.; Pyatt, S.; Anthony, J.C.; Kubba, I.A.; Kubba, E.A. & Olatunbosun, O. Flexible Bond Wire Capacitive Strain Sensor for Vehicle Tyres. *Sensors* 2016, 16.
46. Matsuzaki, R.; Keating, T.; Todoroki, A. & Hiraoka, N. Rubber-Based Strain Sensor Fabricated using Photolithography for Intelligent Tires. *Sensors and Actuators A: Physical* 2008, 148, 1-9.
47. Matsuzaki, R. & Todoroki, A. Wireless Flexible Capacitive Sensor Based on Ultra-Flexible Epoxy Resin for Strain Measurement of Automobile Tires. *Sensors and Actuators A: Physical* 2007, 140, 32-42.

48. Yang, X. Finite Element Analysis of Tyre Characteristics for Developing Strain-Based Intelligent Tire System. 2011.
49. Erdogan, G. New Sensors and Estimation Systems for the Measurement of Tire-Road Friction Coefficient and Tire Slip Variables. 2009.
50. Sohn, J. W.; Jeon, J. & Choi, S. An Investigation on Dynamic Signals of MFC and PVDF Sensors: Experimental Work. *Advances in Mechanical Engineering* 2013, 5, 420345.
51. Kim, S. J.; Kim, K. & Yoon, Y. Development of a Tire Model Based on an Analysis of Tire Strain obtained by an Intelligent Tire System. *International Journal of Automotive Technology* 2015, 16, 865-875.
52. Yi, X. & Tuononen, A. A Laser-Based Sensor System for Tire Tread Deformation Measurement. *Measurement Science and Technology* 2014, 25, 115103.
53. Tuononen, A. Laser Triangulation to Measure the Carcass Deflections of a Rolling Tire. *Measurement Science and Technology* 2011, 22, 125304.
54. Xiong, Y. & Tuononen, A. The in-Plane Deformation of a Tire Carcass: Analysis and Measurement. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing* 2015, 2, 12-18.
55. Lee, J. & Choi, B. Development of a Piezoelectric Energy Harvesting System for Implementing Wireless Sensors on the Tires. *Energy Conversion and Management* 2014, 78, 32-38.
56. Singh, K.B.; Bedekar, V.; Taheri, S. & Priya, S. Piezoelectric Vibration Energy Harvesting System with an Adaptive Frequency Tuning Mechanism for Intelligent Tires. *Mechatronics* 2012, 22, 970-988.
57. Makki, N. & Pop-Iliev, R. Piezoelectric Power Generation in Tires. *SPIE Newsroom* 2011.
58. Meninger, S.; Mur-Miranda, J. O.; Amirtharajah, R.; Chandrakasan, A. & Lang, J. H. Vibration-to-Electric Energy Conversion. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 2001, 9, 64-76.
59. Kubba, E. A. & Jiang, K. A Comprehensive Study on Technologies of Tyre Monitoring Systems and Possible Energy Solutions. *Sensors* 2014, 14.
60. Wang, X.; Song, J.; Liu, J. & Wang, Z.L. Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Waves. *Science* 2007, 316, 102.
61. Pan, C. T. and T.T.W. Development of a Rotary Electromagnetic Microgenerator. *J Micromech Microengineering* 2007, 17, 120.
62. Savaresi, S. M.; Tanelli, M.; Langthaler, P. & Del Re, L. New Regressors for the Direct Identification of Tire Deformation in Road Vehicles Via "In-Tire" Accelerometers. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 2008, 16, 769-780.
63. Kolle, C.; Scherr, W.; Hammerschmidt, D.; Pichler, G.; Motz, M.; Schaffer, B.; Forster, B. & Ausserlechner, U. Ultra Low-Power Monolithically Integrated, Capacitive Pressure Sensor for Tire Pressure Monitoring. In *Sensors*, IEEE, Vienna.
64. Jachowicz, R.S.; Wójtowicz, G. & Weremczuk, J. A Non-Contact Passive Electromagnetic Transmitter to any Capacitive Sensor — Design, Theory, and Model Tests. *Sensors and Actuators A: Physical* 2000, 85, 402-408.

65. Butler, J.C.; Vigliotti, A.J.; Verdi, F.W. & Walsh, S.M. Wireless, Passive, Resonant-Circuit, Inductively Coupled, Inductive Strain Sensor. *Sensors and Actuators A: Physical* 2002, 102, 61-66.
66. Matsuzaki, R.; Todoroki, A.; Kobayashi, H. & Shimamura, Y. Passive Wireless Strain Monitoring of a Tire using Capacitance and Electromagnetic Induction Change. *Advanced Composite Materials* 2005, 14, 147-164.
67. Nabipoor, M. & B.Y.M. A New Passive Telemetry LC Pressure and Temperature Sensor Optimized for TPMS. *Journal of Physics: Conference Series* 2006, 34, 770.
68. Matsuzaki, R. & Todoroki, A. Passive Wireless Strain Monitoring of Actual Tire using Capacitance-resistance Change and Multiple Spectral Features. *Sensors and Actuators A: Physical* 2006, 126, 277-286.
69. Reiter, M. & Wagner, J. Automated Automotive Tire Inflation System – Effect of Tire Pressure on Vehicle Handling. *IFAC Proceedings Volumes* 2010, 43, 638-643.
70. Ergen, S. C.; Sangiovanni-Vincentelli, A.; Sun, X.; Tebano, R.; Alalusi, S.; Audisio, G. & Sabatini, G.. The Tire as an Intelligent Sensor. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* 2009, 28, 941-955.
71. Carcaterra, A. & Roveri, N. Tire Grip Identification Based on Strain Information: Theory and Simulations. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2013, 41, 564-580.
72. Tuononen, A. Vehicle Lateral State Estimation Based on Measured Tyre Forces. *Sensors (Basel, Switzerland)* 2009, 9, 8761-8775.
73. Bolarinwa, E.O. Investigation of the Dynamic Characteristics of Radial Tyre using the Finite Element Method. 2004.
74. AENOR. Tornillos de cabeza avellanada con hueco hexagonal (ISO 10642:2004). 2005.
75. Shigley, J.E. *Diseño en ingeniería mecánica*.; McGraw Hill, 2012.
76. Instituto Técnico de la Estructura en Acero (ITEA). *Diseño De Uniones Atornilladas* (Tomo 13). Disponible online: https://Previa.Uclm.Es/Area/Ing_rural/Acero/Textos/TOMO13.Pdf (accedido por última vez el 5 de febrero de 2018).
77. Vera, C.; Aparicio, F. & Díaz, V. *Teoría De Los Vehículos Automóviles*.; ETS Ingenieros Industriales: Madrid, 2001; pp. 584.
78. Milliken, W.F.; Milliken, D.L. *Race Car Vehicle Dynamics*; SAE International: Troy, MI, USA, 1994.
79. Smith, C.. *Drive to Win: The Essential Guide to Race Driving*.; SAE International, 1996.
80. Gang, C.; Weidong, W.; Guoqun, Z.; Yanjin, G. & Zhonglei, W. Influence of Camber Angle on Rolling Radial Tire Under Braking State. *Procedia Engineering* 2011, 15, 4310-4315.
81. Ying, H. The Simplest Fuzzy Controllers using Different Inference Methods are Different Nonlinear Proportional-Integral Controllers with Variable Gains. *Automatica* 1993, 29, 1579-1589.
82. Boada, M.J.L.; Boada, B.L.; Garcia-Pozuelo, D. & Diaz, V. Neural-Empirical Tyre Model Based on Recursive Lazy Learning Under Combined Longitudinal and Lateral Slip Conditions. *International Journal of Automotive Technology* 2011, 12, 821-829.

83. Ambalal V. Transformation Functions for Trapezoidal Membership Functions. *International Journal of Computational Cognition* 2004, 2, 115–135.
84. Anghelache, G.; Moisescu, R.; Sorohan, Ș. & Buretea, D. Measuring System for Investigation of Tri-Axial Stress Distribution Across the Tyre-road Contact Patch. *Measurement* 2011, 44, 559-568.
85. Ding, N. & Taheri, S. A Modified Dugoff Tire Model for Combined-Slip Forces. *Tire Science and Technology* 2010, 38, 228-244.
86. Best, M.C. A New Empirical 'exponential' Tyre Model. *Int. J. Veh. Des.* 2014, 65, 241-255.
87. Reif, K.; Renner, K. & Saeger, M. Using the Unscented Kalman Filter and a Non-Linear Two-Track Model for Vehicle State Estimation. *IFAC Proceedings Volumes* 2008, 41, 8570-8575.
88. Rajamani, R. Tire-Road Friction Measurement on Highway Vehicles. In *Vehicle Dynamics and Control*, 2nd ed.; Springer US: MA, USA, 2012; pp. 397–425. ISBN 978-1-4614-1433-9.

Anexo A

Publicaciones en revistas científicas

- Título: *A Novel Strain-Based Method to Estimate Tire Conditions Using Fuzzy Logic for Intelligent Tires*.
Autores: Daniel García-Pozuelo, Oluremi Olatunbosun, **Jorge Yunta**, Xiaoguang Yang and Vicente Díaz.
Revista: Sensors.
Journal Impact Factor: 2,677, Q1.
Estado: publicado el 10 de febrero de 2017.
- Título: *A Strain-Based Method to Estimate Slip Angle and Tire Working Conditions for Intelligent Tires Using Fuzzy Logic*.
Autores: Daniel García-Pozuelo, **Jorge Yunta**, Oluremi Olatunbosun and Vicente Díaz.
Revista: Sensors.
Journal Impact Factor: 2,677, Q1.
Estado: publicado el 16 de abril de 2017.
- Título: *A Strain-Based Method to Detect Tires' Loss of Grip and Estimate Lateral Friction Coefficient from Experimental Data by Fuzzy Logic for Intelligent Tire Development*.
Autores: **Jorge Yunta**, Daniel García-Pozuelo, Vicente Díaz and Oluremi Olatunbosun.
Revista: Sensors.
Journal Impact Factor: 2,677, Q1.
Estado: publicado el 6 de febrero de 2018.

Anexo B

Participaciones en congresos

- Título: *Estudio mediante extensometría del comportamiento dinámico de la banda de rodadura de un neumático.*
Autores: **Jorge Yunta**, Daniel García-Pozuelo, Vicente Díaz y M^a Jesús López.
Congreso: XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
Fecha: noviembre de 2016.
Tipo de ponencia: oral.
- Título: *Analysis of the influence of tire working conditions in tire's deformation for intelligent tires development.*
Autores: **Jorge Yunta**, Daniel García-Pozuelo, Oluremi Olatunbosun and Vicente Díaz.
Congreso: 15th European Automotive Congress (EAEC 2017).
Fecha: octubre de 2017.
Tipo de ponencia: oral.
- Título: *Experimental research of tire tread behavior in cornering conditions for intelligent tires development.*
Autores: **Jorge Yunta**, Daniel García-Pozuelo, Oluremi Olatunbosun and Vicente Díaz.
Congreso: 15th European Automotive Congress (EAEC 2017).
Fecha: octubre de 2017.
Tipo de ponencia: oral.
- Título: *Estimación del coeficiente de adherencia lateral solicitado en el contacto neumático-calzada mediante extensometría y lógica difusa para el desarrollo del neumático inteligente.*
Autores: **Jorge Yunta**, Daniel García-Pozuelo y Vicente Díaz.
Congreso: XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
Fecha: septiembre de 2018.
Tipo de ponencia: oral.
- Título: *Análisis de la influencia del ángulo de caída en la deformación de la banda de rodadura de un neumático mediante extensometría.*
Autores: **Jorge Yunta**, Daniel García-Pozuelo, Ester Olmeda y Vicente Díaz.
Congreso: XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
Fecha: septiembre de 2018.
Tipo de ponencia: oral.